



**IVO SÉRGIO  
PINHO DE JESUS**

**RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COLADAS METAL-  
METAL**



**IVO SÉRGIO  
PINHO DE JESUS**

**RESISTÊNCIA DE LIGAÇÕES COLADAS METAL-  
METAL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Alfredo Balacó de Moraes e Doutor António Bastos Pereira, Professor Associado e Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo o apoio, que permitiram que este momento fosse possível.

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo**  
professor associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Lucas Filipe Martins da Silva**  
professor auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes**  
professor associado da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor António Manuel de Bastos Pereira**  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Aos meus orientadores, Prof. Doutor Alfredo Morais e Prof. Doutor António Pereira, por terem partilhado comigo o seu dotado conhecimento. À Inês e à Rosa, pela sua colaboração nesta tese. À família e amigos, por todo o apoio prestado.

## palavras-chave

ligações coladas, juntas de bissobreposição simples, ensaios experimentais, resistência das juntas, análises por elementos finitos, critério de rotura.

## resumo

As juntas coladas são cada vez mais usadas em aplicações estruturais. Todavia, apesar dos muitos estudos já apresentados, continua a não haver critérios de rotura universalmente aceites que sirvam de base ao dimensionamento. O presente trabalho pretendeu dar um contributo para a definição de critérios de rotura de juntas coladas. O objecto de estudo foram as juntas de bissobreposição simples de chapas de aço inoxidável coladas com um adesivo epóxico largamente utilizado, a *araldit standard*.

Realizaram-se ensaios ao corte via tracção das chapas de juntas com várias espessuras de aderente e vários comprimentos de sobreposição. Os resultados experimentais revelaram as tendências gerais esperadas, mas houve algumas anomalias que se julga estarem ligadas à degradação dos lotes de adesivo usados e a excessos de cola nos bordos. Além disso, houveram dispersões estatísticas elevadas nas resistências, que se deveram provavelmente à rotura adesiva observada e ao facto de cada provete envolver duas juntas de sobreposição simples.

Posteriormente compararam-se os resultados experimentais com simulações numéricas por elementos finitos, que tiveram em conta o comportamento elasto-plástico dos aderentes e do adesivo. No caso deste último, porém, só foi possível considerar uma aproximação elasto-perfeitamente plástica obtida de ensaios de provetes maciços. Esta aproximação foi provavelmente a causa de algumas discrepâncias entre as curvas carga-deslocamento numéricas e experimentais.

Com base nas simulações e nos resultados experimentais procurou-se relacionar a rotura das juntas com o atingir de deformações limite de tracção ou de corte no adesivo. Os resultados não foram claros a este respeito, se bem que alguns resultados dêem suporte aqueles critérios.

**keywords**

adhesive joints, strap joints, experimental tests, joint strength, finite element analyses, failure criterion

**abstract**

Bonded joints are increasingly used in structural applications. However, widely accepted failure criteria remain unavailable for accurate design, in spite of the many studies reported. The present work aimed at contributing to the identification of such criteria. It involved single strap joints of stainless steel adherends bonded by the well-known *araldit standard* epoxy adhesive.

Lap shear tests on conducted on joints with different adherend thicknesses and overlap lengths. In general, the results followed the expected trends, though some anomalies were seen. The most likely causes were adhesive fillets and batch degradation. High scatter on joint strengths was observed, which was probably due to the adhesive failure mode and to the fact that the specimens tested involve two single-lap joints.

Experimental results were compared to finite element analyses which considered elastic-plastic behaviour of adherends and adhesive. For the latter, however, it was only possible to adopt an elastic- perfectly plastic approximation obtained from bulk adhesive tests. This approximation was probably behind some discrepancies between experimental and numerical load-displacement curves.

Finally, simulations and experimental results were combined in order to relate joint failure with the attainment of adhesive limit tensile and shear strains. No clear conclusions could be drawn, but some results did support such criteria.

# Índice

	Pág.
<b>1. Introdução</b>	2
1.1. Características gerais das ligações coladas	2
1.2. Análises de tensões	4
1.3. Os adesivos estruturais	7
1.4. Caracterização dos adesivos	8
1.5. Preparação das superfícies	9
1.6. Conclusão	10
<b>2. Simulações numéricas</b>	11
2.1. Definição das geometrias e construção dos modelos	11
2.2. Estudos de refinamento da malha de elementos finitos	13
2.3. Efeito da geometria nas tensões nos bordos	16
2.4. Análises elasto-plásticas das ligações	20
<b>3. Trabalho experimental</b>	23
3.1. Procedimentos	23
3.2. Resultados experimentais	26
3.3. Comparação modelos numéricos – resultados experimentais	36
<b>4. Conclusões e trabalhos futuros</b>	47
<b>Referências</b>	49



# 1. Introdução

## 1.1. Características gerais das ligações coladas

Desde a década de quarenta do século XX, quando os produtos monoméricos se tornaram viáveis, assistiu-se a uma utilização crescente de ligações coladas. Estas têm vindo progressivamente a substituir ligações convencionais, tais como ligações aparafusadas, ligações rebitadas, brasagem e soldagem [Adams e outros 1997]. De facto, as ligações coladas apresentam vantagens significativas em relação a outros tipos de ligações, por exemplo, elevadas relações resistência-peso, boa resistência à fadiga, elevada resistência à corrosão e boa aparência estética. Todavia, há que ter em conta limitações relevantes, tais como a necessidade de preparação das superfícies, a temperatura de funcionamento limitada e a inexistência actual de métodos de dimensionamento rigorosos aceites consensualmente.

As ligações coladas são frequentemente juntas de sobreposição (*lap joints*) ou juntas de bissobreposição (*strap joints*), representadas esquematicamente na figura 1.1, e sujeitas a cargas de tracção aplicadas às chapas. Estas geram principalmente tensões de corte na camada adesiva (figura 1.2).

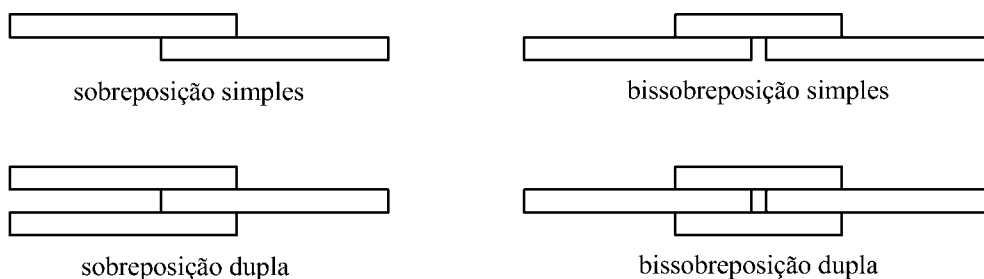


Figura 1.1. Juntas coladas de sobreposição e de bissobreposição [Morais 2005].



Figura 1.2. Deformação de corte ideal numa junta de sobreposição [ITW 2009].

Todavia, nas extremidades das ligações de sobreposição e de bissobreposição, a flexão das chapas associada ao desalinhamento inicial das forças (1.3) provoca tensões de tracção altamente localizadas, também designadas por tensões de clivagem (*peel stresses*). Estas tensões prejudicam a resistência da junta e devem por isso ser minimizadas.

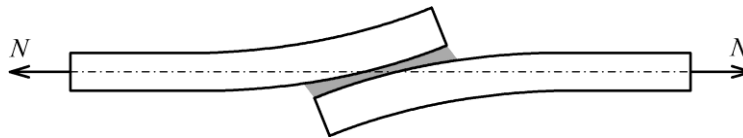


Figura 1.3. Efeito de flexão das chapas [Morais 2005].

A figura 1.4 representa os três modos de rotura principais das juntas coladas. A rotura adesiva está frequentemente associada à contaminação e/ou preparação inadequada das superfícies, ou à exposição prolongada a ambientes de temperatura e humidade relativamente elevadas [Adams e outros 1997, Adams e outros 2009]. Por seu turno, a rotura de uma chapa significa que a ligação é mais forte, situação que é muitas vezes desejável no projecto mecânico.

As juntas de sobreposição dupla têm naturalmente maior resistência do que as de sobreposição simples. Porém, são mais difíceis, ou mesmo impossíveis, de executar por questões de montagem e acessibilidade. A maioria das aplicações estruturais envolve por isso ligações de sobreposição ou de bissobreposição simples.

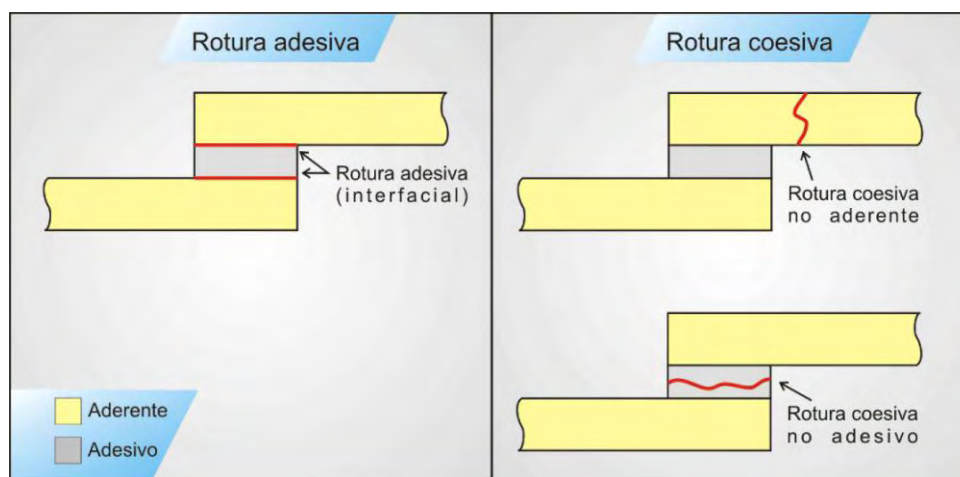


Figura 1.4. Representação dos diferentes modos de ruptura em juntas coladas de sobreposição simples.

## 1.2. Análises de tensões

Desde o primeiro modelo de Volkersen, que ignorou o efeito de flexão das chapas, foram apresentadas várias análises de tensões em juntas de sobreposição simples com chapas à tracção [Silva e outros 2009a, Silva e outros 2009b]. O modelo mais conhecido é o de Goland e Reissner para chapas do mesmo material e da mesma espessura. A flexão das chapas torna as equações relativamente longas. Os resultados mostram acentuados gradientes de tensões de corte e de clivagem junto aos bordos (figura 1.5).

Na realidade, os modelos analíticos têm várias limitações, tais como não permitirem ter em conta de forma rigorosa os efeitos de não-linearidade geométrica e de plastificação do adesivo. Não obstante, quando combinados com um critério de ruptura do adesivo ou de cedência dos aderentes, permitem obter previsões razoáveis em alguns casos [Silva e outros 2009b].

Relativamente às ligações de bissobreposição simples, as análises são bastante mais complicadas e as expressões para as tensões no adesivo extremamente longas [Shahin e Taheri 2007, Zou e outros 2004]. Logo, os modelos numéricos parecem ser a opção mais viável para prever a ruptura da junta.

Foram já apresentados vários trabalhos de modelação por elementos finitos usando diversas abordagens [Castagnetti e Dragoni 2009]. As ligações de sobreposição são normalmente modeladas com elementos finitos bidimensionais. Há, contudo, dificuldades na determinação das tensões no adesivo junto aos bordos, devido à

existência de uma singularidade na interface adesivo/chapa [Towse e outros 1999, Wang e Rose 2000]. Isto torna os resultados dos modelos de elementos finitos sensíveis ao refinamento local da malha. Para evitar esta dificuldade propôs-se modelar a camada adesiva com uma única camada de elementos finitos de deformação constante [Morais e outros 2007]. Castagnetti e Dragoni [2009] mostraram ainda que os resultados se mantêm bastante rigorosos quando as chapas são modeladas com elementos de viga ligados cinematicamente à camada de elementos do adesivo. Outra abordagem consiste na utilização de elementos de interface para modelar a camada adesiva, impondo critérios de rotura baseados nas taxas críticas de libertação de energia [Tvergaard e Hutchinson 1996, Yang e Thouless 2001, Kafkalidis e Thouless 2002, Campilho e outros 2009].

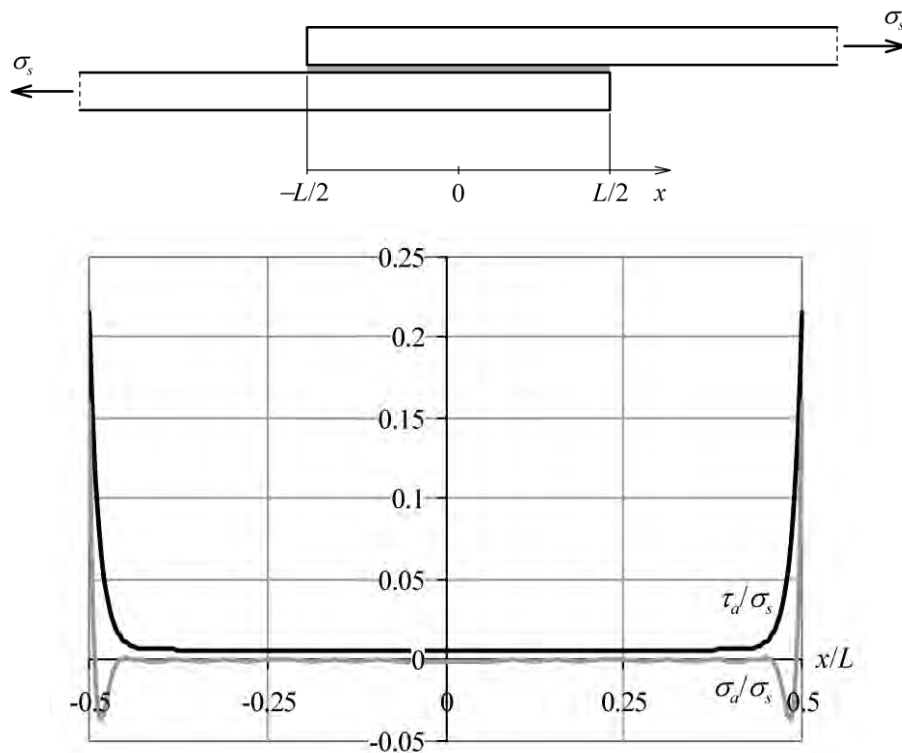


Figura 1.5. Distribuições de tensões de corte ( $\tau_a$ ) e normal ( $\sigma_a$ ) no adesivo previstas pelo modelo de Goland-Reissner [Morais 2005]. As tensões estão normalizadas pela tensão de tração na chapa ( $\sigma_s$ ).

Há portanto várias metodologias de análise e previsão da rotura de juntas que têm permitido obter boa concordância com alguns resultados experimentais. Todavia, não existe actualmente nenhum critério de rotura consensual [Silva e outros 2009b].

Apesar destas incertezas, está bem demonstrada a importância para a resistência da junta da ductilidade do adesivo, de modo a acomodar os elevados gradientes de tensões junto aos bordos [Hart-Smith 1987]. A figura 1.6 representa esquematicamente as distribuições da tensão de corte numa junta de sobreposição simples para um adesivo frágil e para um adesivo dúctil. A tensão é elevada nas extremidades da junta para o adesivo frágil, enquanto que há uma maior uniformidade da tensão com o adesivo dúctil. Isto faz com que a carga de rotura aumente numa fase inicial de forma praticamente linear com o comprimento de sobreposição no caso dos adesivos dúcteis (figura 1.7).

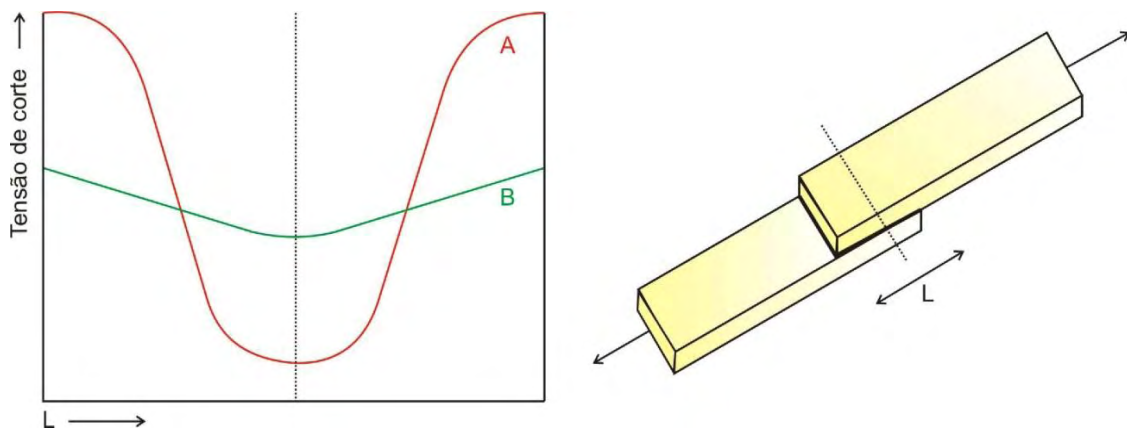


Figura 1.6. Representação esquemática das distribuições da tensão de corte numa junta de sobreposição simples colada com um adesivo frágil (A) e com um adesivo dúctil (B) [Carbas 2008].

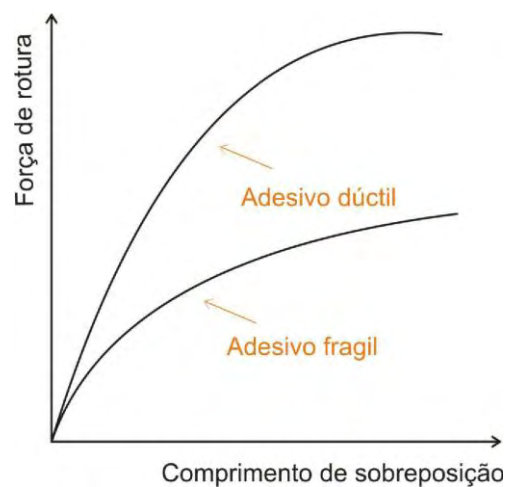


Figura 1.7. Efeito do comprimento de sobreposição na carga de rotura para adesivos dúcteis e frágeis [Carbas 2008].

### 1.3. Os adesivos estruturais

O adesivo a escolher para a junta é de extrema importância. Os adesivos estruturais mais comuns são os epóxidos, poliuretanos, acrílicos, cianocrilatos, anaeróbicos, metacrilatos e os “*hot melt*” [ITW 2009].

Os adesivos epóxidos são dos adesivos mais utilizados e que estão disponíveis há mais tempo. Apresentam uma resistência mecânica muito superior à dos poliuretanos, oferecendo também uma boa resistência química e um bom comportamento à fluência. Os adesivos epóxidos podem apresentar-se sob a forma de dois componentes (resina e endurecedor) a misturar segundo proporções indicadas, ou sob a forma de um só componente, exigindo armazenamento a baixas temperaturas para evitar cura prematura. A cura é normalmente realizada a temperaturas entre 20 e 120 °C.

Os adesivos poliuretanos curam por reacção química com a humidade. As principais vantagens são a excelente tenacidade, que faz com que a junta possa acomodar deformações elevadas, e o custo moderado [Carbas 2008].

Uma das principais vantagens dos adesivos acrílicos é que não necessitam de uma preparação de superfície exigente. Na execução da colagem a resina é aplicada numa superfície e o agente endurecedor noutra. Actualmente existem acrílicos modificados que permitem características semelhantes às dos adesivos epóxidos ou dos poliuretanos [WP 2009].

Os cianoacrilatos são adesivos monocomponente de cura rápida e de fácil aplicação a temperatura ambiente. Têm também uma tensão de rotura relativamente elevada e boa resistência à clivagem. Todavia, estes adesivos só são viáveis para colagem de pequenas áreas e não são indicados para a colagem de materiais diferentes. Além disso, a durabilidade das ligações é relativamente baixa [WP 2009].

Os adesivos anaeróbicos são dos mais fáceis de aplicar, devido ao processo de cura ser despoletado pela privação de oxigénio. A cura é, porém, relativamente lenta. Estes adesivos são conhecidos por terem uma elevada tensão de rotura coesiva e uma baixa tensão de descoesão interfacial. São indicados para aderentes plásticos ou de borracha [ITW 2009].

Há também outros grupos de adesivos, como é o caso das poliimidas e das bismaleimidas. As poliimidas são indicadas para altas temperaturas, ao passo que os bismaleimidas têm a vantagem de não libertarem gases durante a cura e portanto serem menos susceptíveis de desenvolver porosidades e fendas [Silva 2005].

Independentemente do adesivo escolhido, a espessura da camada de cola influencia o desempenho da junta. Actualmente a espessura óptima situa-se habitualmente entre 0.1 e 0.2 mm, valor acima do qual se verifica uma diminuição da resistência da junta devido à maior probabilidade de aparecimento de defeitos (bolhas de ar, micro fendas) [Carbas 2008]. Além disso, como sugere a figura 1.8, a plastificação tende a ocorrer mais facilmente para uma junta com maior espessura [Carbas 2008]. Por outro lado, para valores inferiores a 0.1 mm agrava-se consideravelmente o risco de falhas de colagem [Carbas 2008]. O controlo da espessura do adesivo é normalmente feito através dos dispositivos de fixação utilizados na operação de colagem.

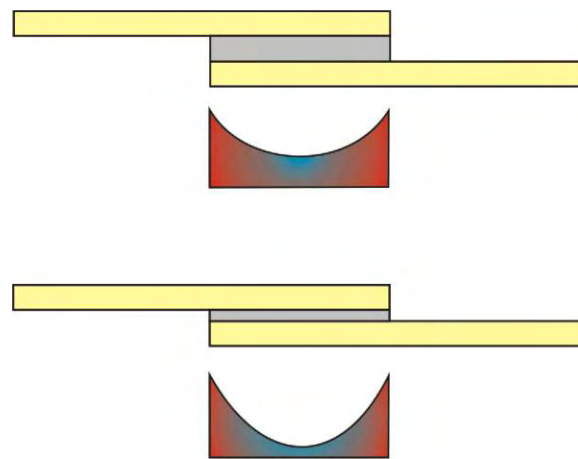


Figura 1.8. Representação esquemática do efeito da espessura da cola na distribuição das tensões de corte [Carbas 2008].

## 1.4. Caracterização dos adesivos

A caracterização dos adesivos através do ensaio de juntas apresenta várias dificuldades resultantes da pequena espessura da camada adesiva e de componentes de tensão indesejadas, por exemplo, tensões de clivagem nas juntas de sobreposição simples. Não obstante, o ensaio dito de aderente espesso (figura 1.9) permite obter o comportamento tensão - deformação ao corte, estando actualmente normalizado pela ASTM e ISO. Trata-se de uma junta de sobreposição simples com aderentes de elevada espessura  $t$  para minimizar deformações de flexão e tensões de clivagem. A sobreposição  $L$  é pequena para que a distribuição da tensão de corte seja aproximadamente uniforme.

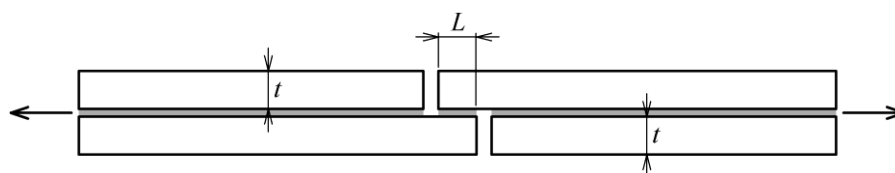


Figura 1.9. Representação esquemática do ensaio de “aderentes espessos” [Morais 2005].

Relativamente ao comportamento à tracção e à compressão, recorre-se aos ensaios usados para materiais poliméricos na forma maciça. Todavia, as formulações dos adesivos não estão normalmente preparadas para as espessuras dos provetes, o que torna necessários cuidados especiais na preparação daqueles para evitar o aparecimento de bolhas de ar [Silva e Adams 2005].

## 1.5. Preparação das superfícies

A resistência de uma junta colada depende acentuadamente da preparação adequada das superfícies [Adams e outros 2007, Adams e outros 2009]. Inicialmente, há que proceder à limpeza das superfícies, removendo gorduras, resíduos de lubrificantes ou desmoldantes, etc. Para tal recorre-se a solventes, soluções detergentes, vapor de Tricloroetano (tóxico), ultra-sons, etc.

Por outro lado, deve-se promover a adesão ao substrato, o que é normalmente conseguido através do aumento da rugosidade das superfícies e/ou da realização de tratamentos químicos. No primeiro caso, a ligação é fortalecida pelo aumento da área de contacto adesivo-substrato. O aumento da rugosidade pode ser obtido por aplicação de papéis abrasivos ou de projecção de grenalha. As partículas soltas têm de ser posteriormente removidas e as superfícies desengorduradas. Por seu turno, nos tratamentos químicos de substratos metálicos substitui-se a camada de óxido inicial por outra mais favorável à adesão.



## **1.6. Conclusão**

A revisão bibliográfica efectuada mostrou a necessidade de mais estudos acerca do desempenho estrutural das juntas coladas, nomeadamente no que diz respeito à previsão da rotura das juntas, assunto para o qual este trabalho procura dar um contributo.

Refira-se que o presente trabalho decorre em paralelo com outros em que o objecto de estudo é o comportamento mecânico do adesivo estrutural aqui utilizado. Por outro lado, este trabalho debruça-se sobre as juntas de bissobreposição simples, face aos poucos estudos disponíveis na bibliografia e ao interesse prático das suas aplicações. Concretamente, procurou-se definir um critério de rotura com base em resultados de simulações numéricas e de ensaios experimentais para juntas com diversas geometrias.

## 2. Simulações numéricas

### 2.1. Definição das geometrias e construção dos modelos

Neste trabalho estudou-se a resistência de juntas de bissobreposição simples ao corte, com origem na tracção dos aderentes. Como se viu no capítulo 1.2, a análise de tensões rigorosa de uma junta deste tipo só está ao alcance de modelos numéricos. Recorreu-se por isso a simulações numéricas com o objectivo inicial de avaliar o efeito da geometria das juntas nos níveis de tensões junto aos bordos, onde se inicia a rotura. Nas geometrias analisadas (figura 2.1) usou-se largura  $b = 25$  mm, comprimentos de sobreposição  $L = 12.5, 25$  e  $40$  mm e espessuras das chapas aderentes  $t = 1.5, 3$  e  $5$  mm.

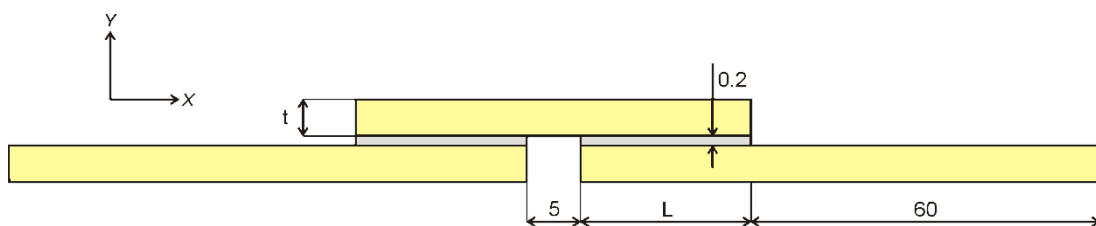


Figura 2.1. Geometria (mm) da junta de bissobreposição simples estudada.

O material escolhido para os aderentes foi o aço inox *AISI 304*, enquanto que o adesivo usado foi a *Araldit Standard*<sup>®</sup>. As propriedades elásticas destes materiais são

módulo de Young  $E = 193$  e  $1.8$  GPa e coeficientes de Poisson  $\nu = 0.30$  e  $0.38$ , respectivamente.

As simulações foram realizadas com o *software* de elementos finitos *Abaqus 6.8*<sup>®</sup> através de modelos bidimensionais de estado plano de deformação. Devido à simetria da geometria e do carregamento, apenas se modelou meia-junta, impondo as condições fronteira correspondentes (figura 2.2). O carregamento consistiu na imposição de um deslocamento horizontal  $U = 0.1$  mm uniforme, com análise linear geométrica.



Figura 2.2. Esquema da malha de elementos finitos, com indicação das condições fronteira e do carregamento imposto.

As malhas foram construídas com elementos de 4 nós e integração reduzida *CPE4R* tanto para o adesivo, como para o aderente. Note-se que este tipo de elementos não é o mais eficiente para as análises lineares elásticas desta fase do trabalho, pois exige malhas bastante refinadas. Todavia, são elementos de baixo custo computacional e são apropriados para modelar deformações plásticas que ocorrem antes da rotura. Além disso, segundo [Morais e outros 2007], estes elementos permitem contornar o problema da singularidade do campo de tensões na interface adesivo/aderente junto aos bordos, desde que se modele o adesivo com uma única camada de elementos. Não obstante, há fortes gradientes de tensões junto aos bordos (figura 2.3) que têm de ser correctamente modelados. Logo, o refinamento junto aos bordos da malha teve de ser cuidadosamente estudado, sobretudo na direcção  $x$  da carga imposta (figuras 2.1 e 2.2). Procedeu-se por isso a um estudo prévio com malhas de elementos finitos para assegurar que os resultados finais não seriam sensíveis ao refinamento da malha. Os tamanhos dos elementos usados junto aos bordos foram  $L_x = 0.50$ ,  $0.25$  e  $0.10$  mm.

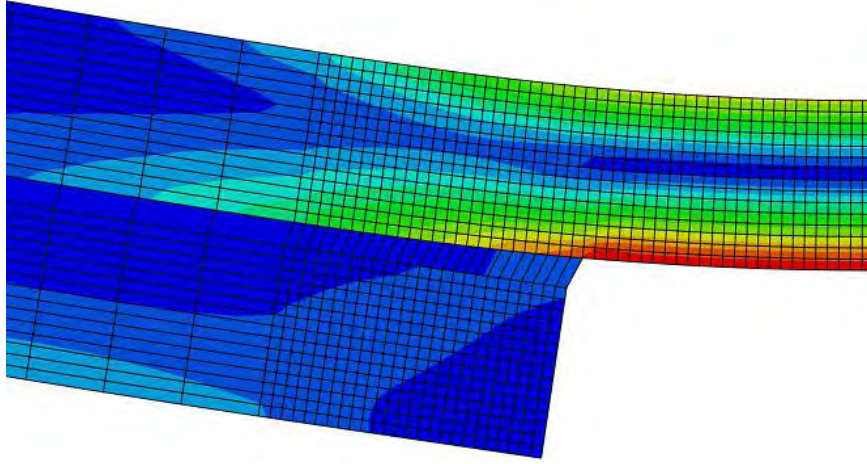


Figura 2.3. Vista pormenorizada do bordo interno de um modelo de elementos finitos da junta na configuração deformada (factor de ampliação da deformação é 614)

## 2.2. Estudos de refinamento da malha de elementos finitos

Para efeitos de estudo de refinamento da malha analisaram-se os casos extremos de geometrias das juntas, correspondentes às combinações de  $L = 12.5$  e  $40$  mm com as espessuras  $t = 1.5$  e  $5$  mm dos aderentes. Os resultados obtidos para as tensões máximas nos bordos são apresentados nas figuras 2.4 a 2.7. Note-se que as tensões apresentadas

$$\bar{\sigma}_x = \frac{\sigma_x}{\bar{\tau}}, \quad \bar{\sigma}_y = \frac{\sigma_y}{\bar{\tau}}, \quad \bar{\sigma}_z = \frac{\sigma_z}{\bar{\tau}}, \quad \bar{\tau}_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\bar{\tau}} \quad (1)$$

resultaram da normalização das tensões obtidas dos modelos pela tensão de corte média,

$$\bar{\tau} = \frac{P}{bL} \quad (2)$$

Sendo  $P$  a carga na extremidade associada ao deslocamento imposto. As referidas figuras mostram que as tensões já são praticamente independentes da malha com  $L_x = 0.10$  mm, excepto a tensão de clivagem  $\sigma_y$  para  $t = 1.5$  mm, em que parece haver uma relação quase linear com o nível de refinamento. Todavia, ainda que se essa variação se mantivesse linear para maiores refinamentos, a malha com  $L_x = 0.10$  mm seria já uma boa aproximação. Nestas circunstâncias, as simulações subsequentes foram feitas com este nível de refinamento.

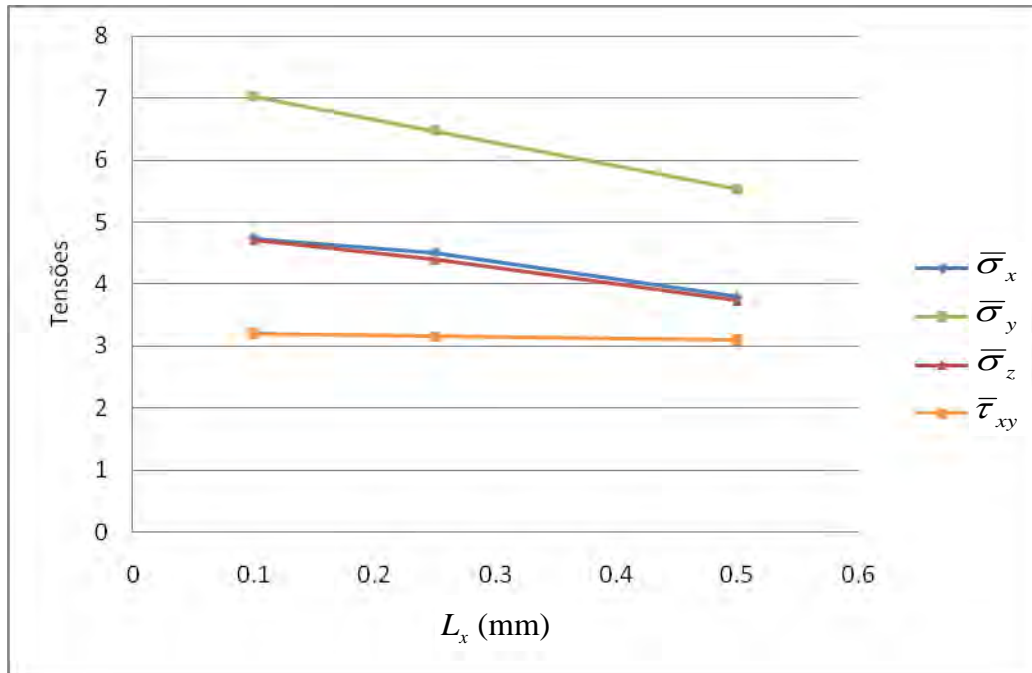


Figura 2.4. Tensões normalizadas máximas nos bordos da junta em função do nível de refinamento local de malha para  $L = 12.5$  mm e  $t = 1.5$  mm.

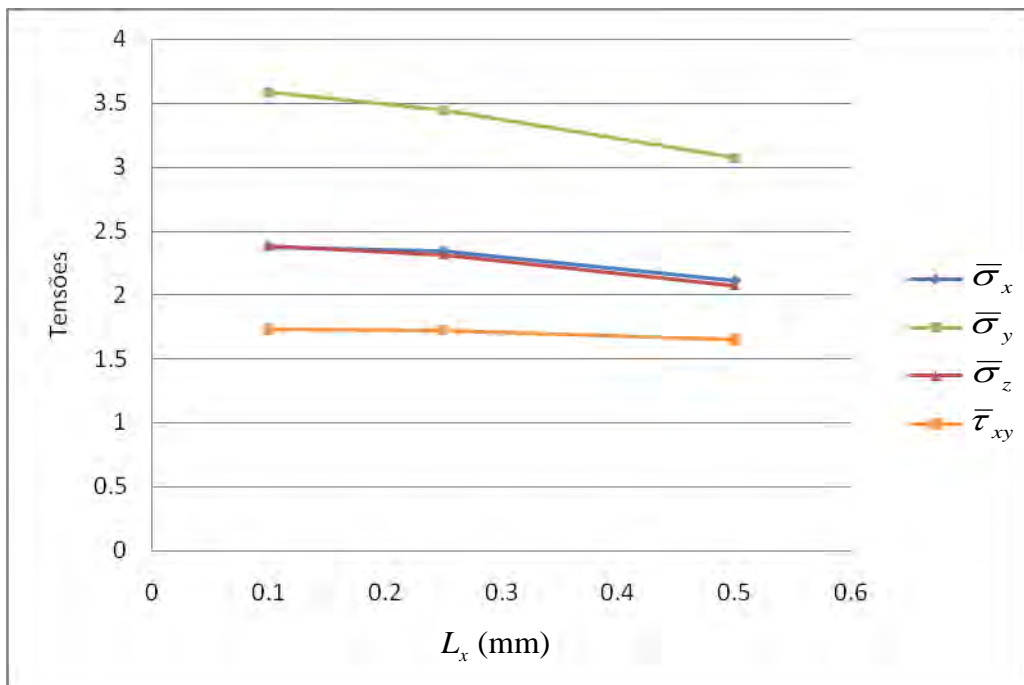


Figura 2.5. Tensões normalizadas máximas nos bordos da junta em função do nível de refinamento local de malha para  $L = 12.5$  mm e  $t = 5$  mm.

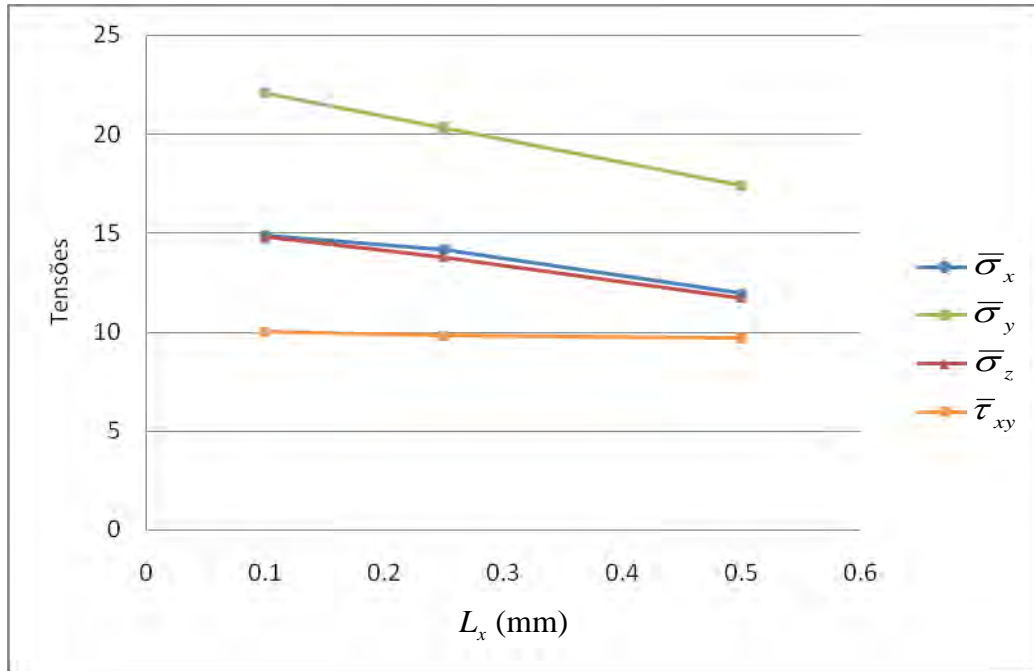


Figura 2.6. Tensões normalizadas máximas nos bordos da junta em função do nível de refinamento local de malha para  $L = 40$  mm e  $t = 1.5$  mm.

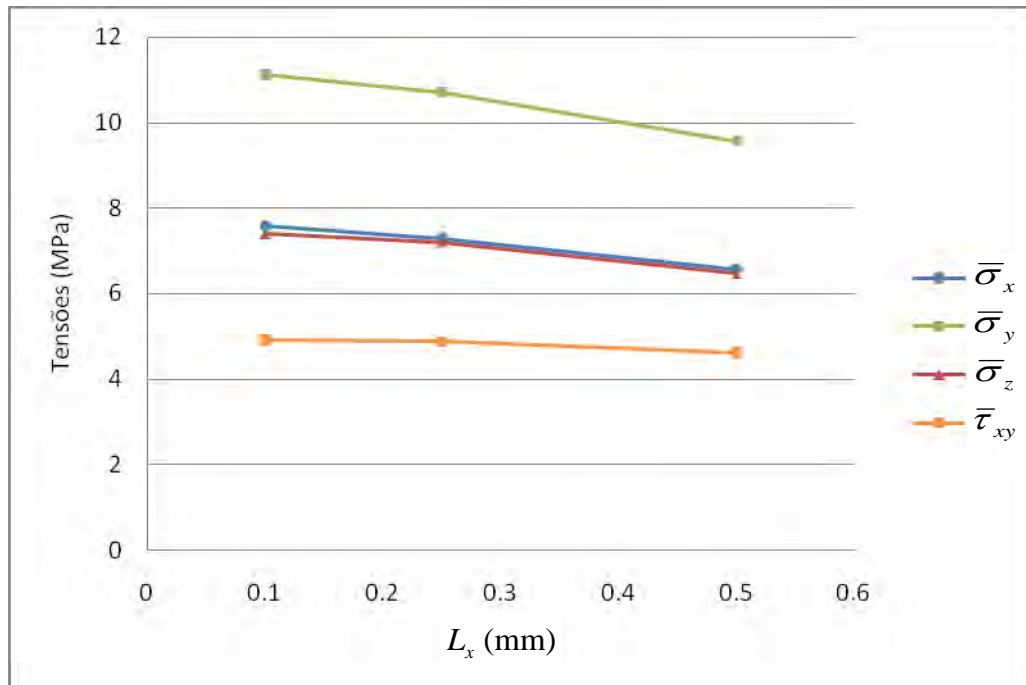


Figura 2.7. Tensões normalizadas máximas nos bordos da junta em função do nível de refinamento local de malha para  $L = 40$  mm e  $t = 5$  mm.

### 2.3. Efeito da geometria nas tensões nos bordos

Nesta fase determinaram-se as distribuições de tensões e o efeito da geometria nas tensões máximas nos bordos a partir de simulações lineares elásticas. As figuras 2.8 a 2.11 mostram as distribuições para os casos extremos de  $L$  e  $t$ . Verifica-se que todas as componentes das tensões são da mesma ordem de grandeza, e que têm os valores máximos no bordo interno da junta. Além disso, apesar de atingirem picos maiores, as tensões normais são muito mais localizadas do que as tensões de corte.

Por seu turno, as figuras 2.12 a 2.15 ilustram o efeito da sobreposição e da espessura dos aderentes nas tensões máximas. Verifica-se que as tensões máximas aumentam com  $L$  no campo de valores considerado, devido à maior rigidez da ligação e à forma intrínseca da distribuição de tensões, com picos junto aos bordos. Por outro lado, o aumento da espessura faz diminuir as deformações do aderente, sobretudo o efeito de flexão, e portanto também as tensões no adesivo.

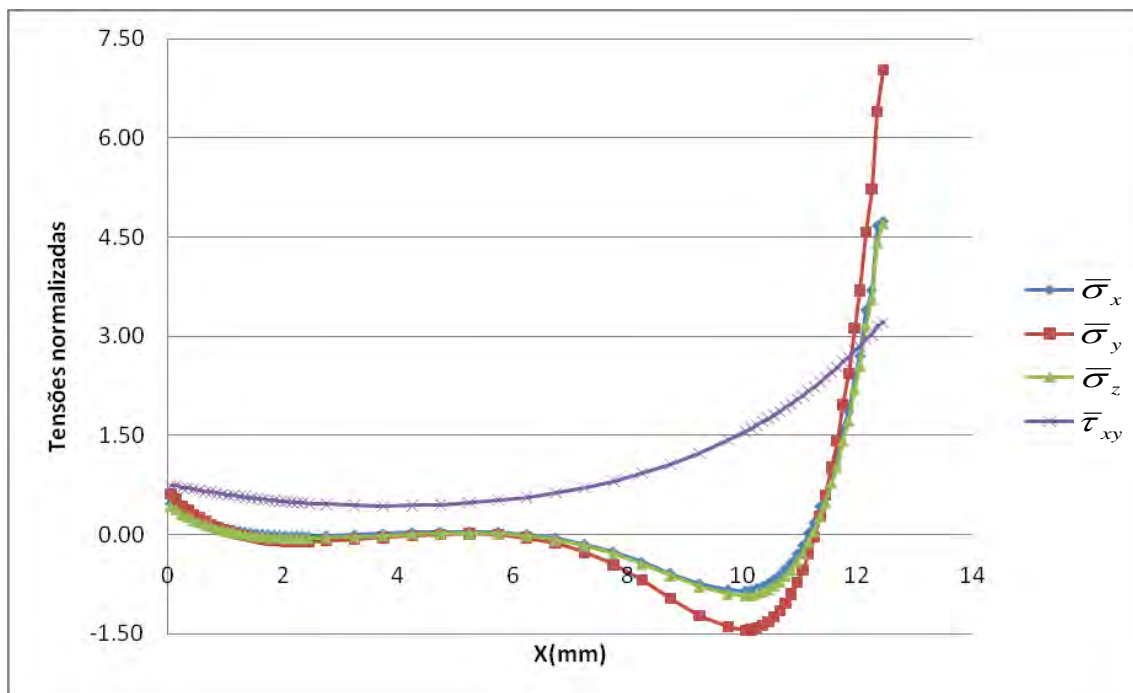


Figura 2.8. Distribuições das tensões normalizadas ao longo da sobreposição de uma junta com  $L = 12.5$  mm e  $t = 1.5$  mm.

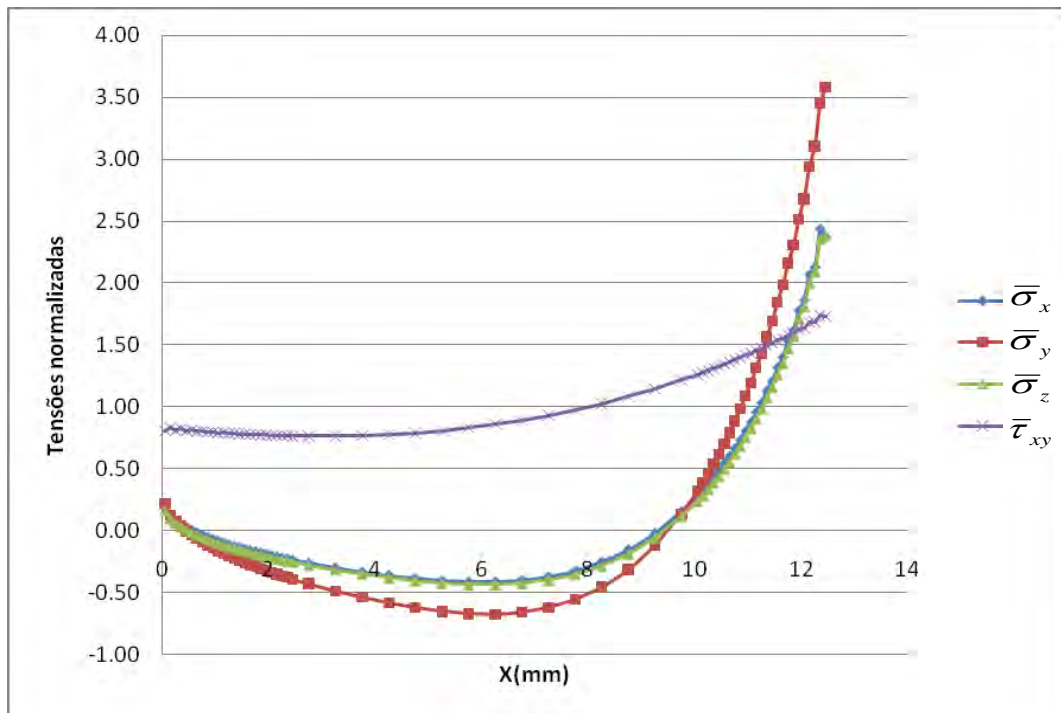


Figura 2.9. Distribuições das tensões normalizadas ao longo da sobreposição de uma junta com  $L = 12.5$  mm e  $t = 5$  mm.

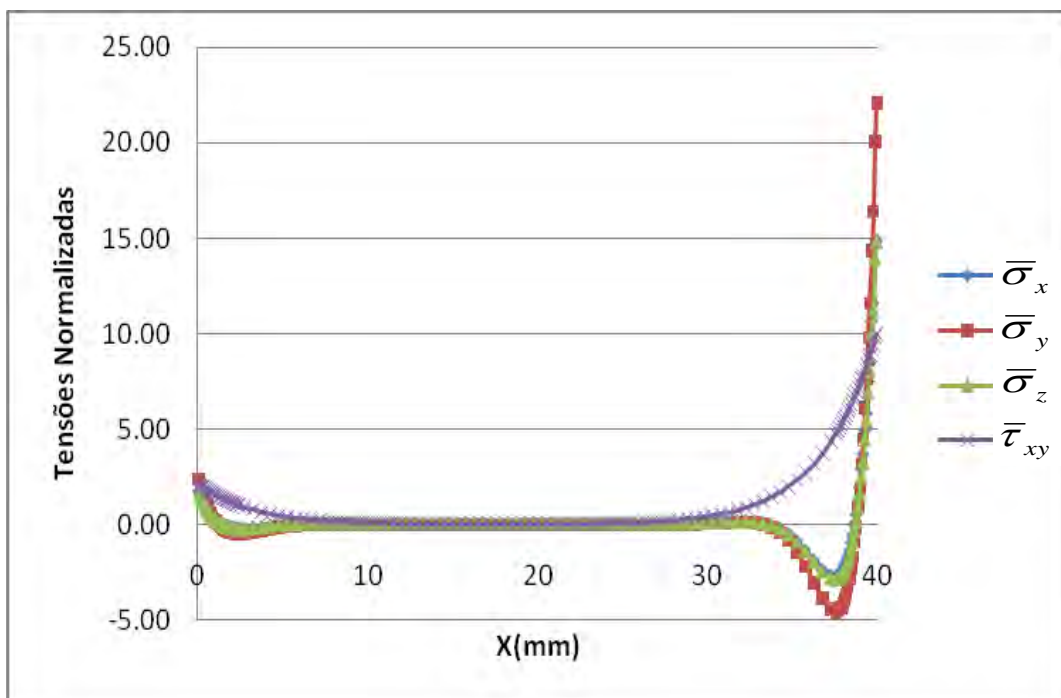


Figura 2.10. Distribuições das tensões normalizadas ao longo da sobreposição de uma junta com  $L = 40$  mm e  $t = 1.5$  mm.



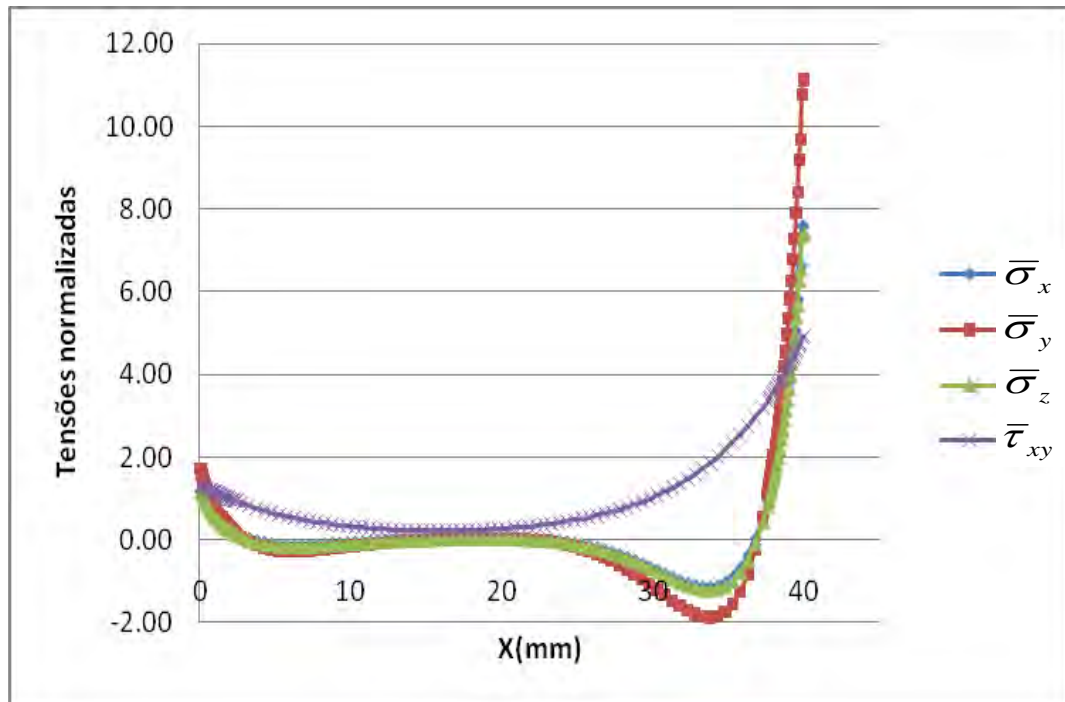


Figura 2.11. Distribuições das tensões normalizadas ao longo da sobreposição de uma junta com  $L = 40$  mm e  $t = 5$  mm.

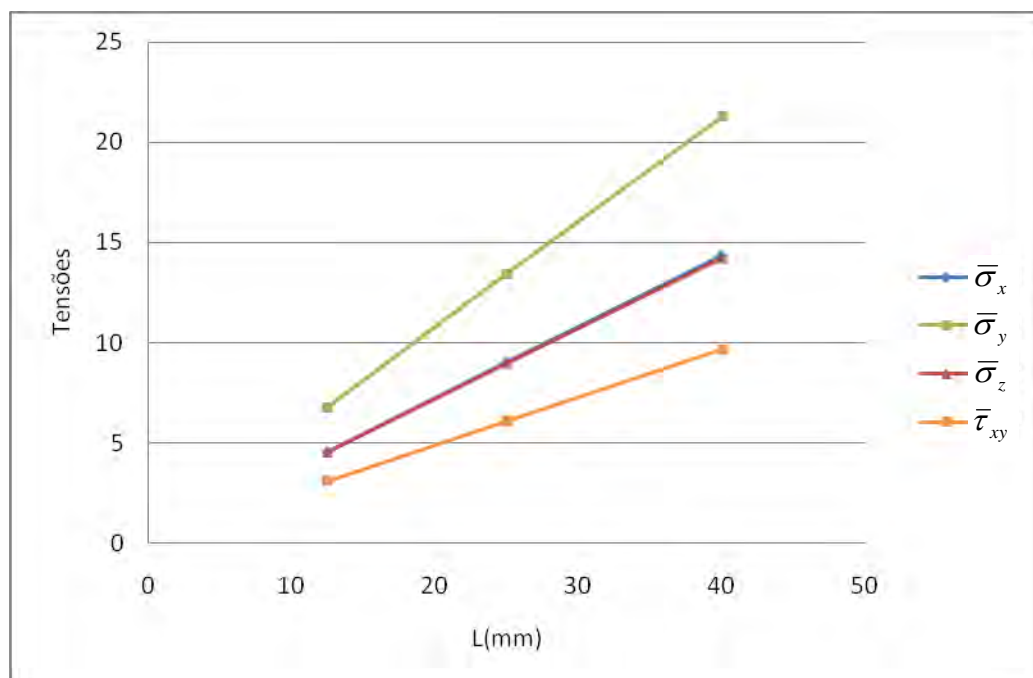


Figura 2.12. Efeito da sobreposição nas tensões normalizadas máximas nos bordos das juntas com  $t = 1.5$  mm.

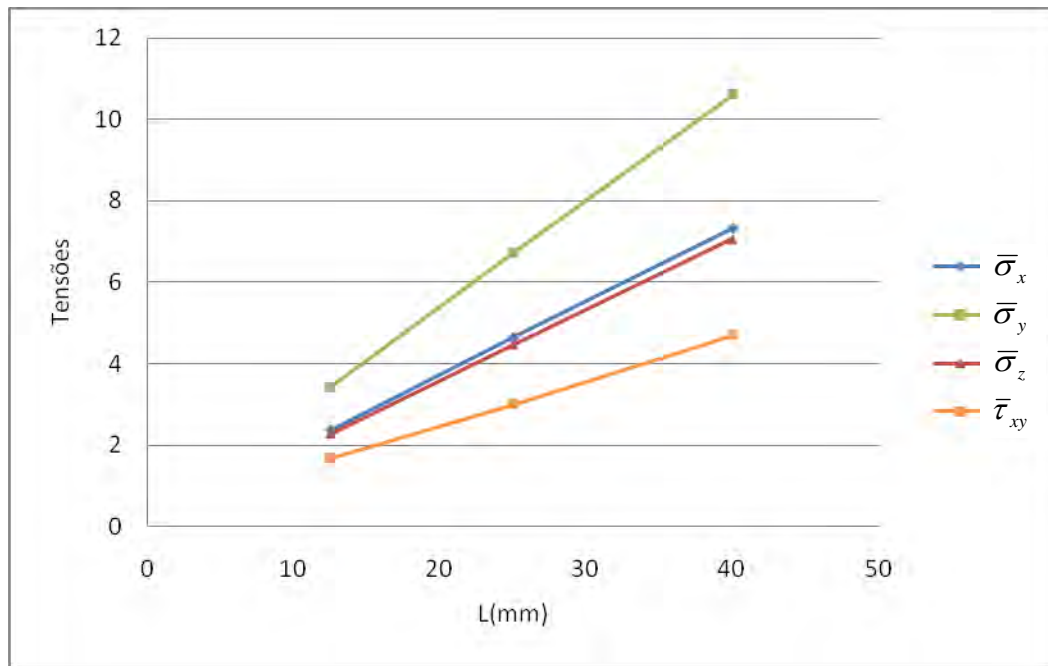


Figura 2.13. Efeito da sobreposição nas tensões normalizadas máximas nos bordos das juntas com  $t = 5$  mm.

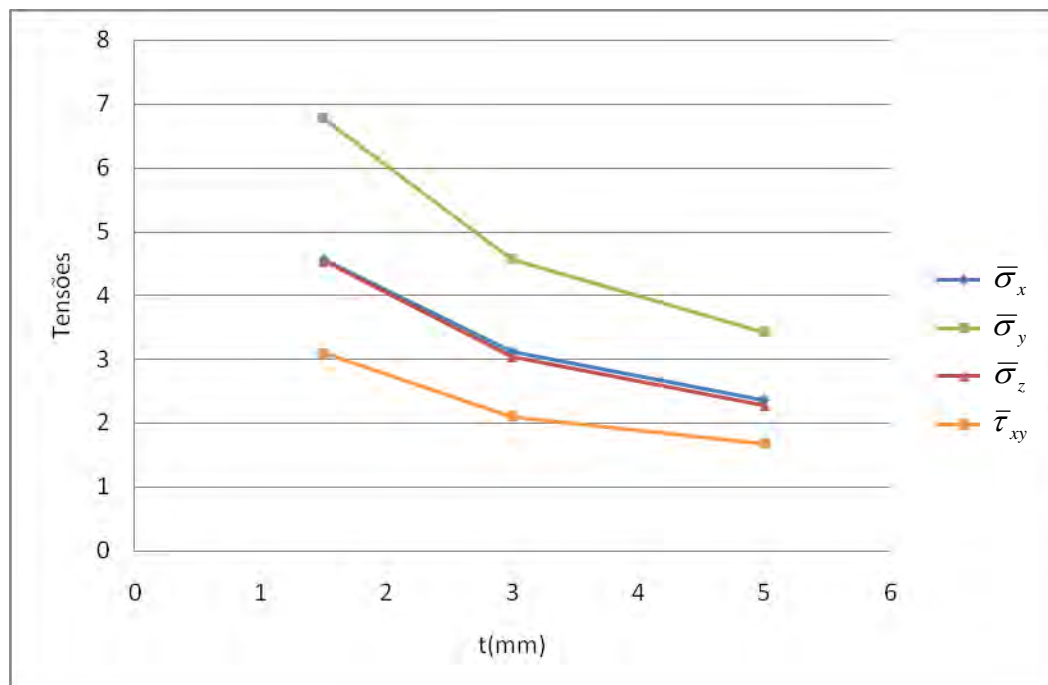


Figura 2.14. Efeito da espessura dos aderentes nas tensões normalizadas máximas nos bordos das juntas com  $L = 12.5$  mm.

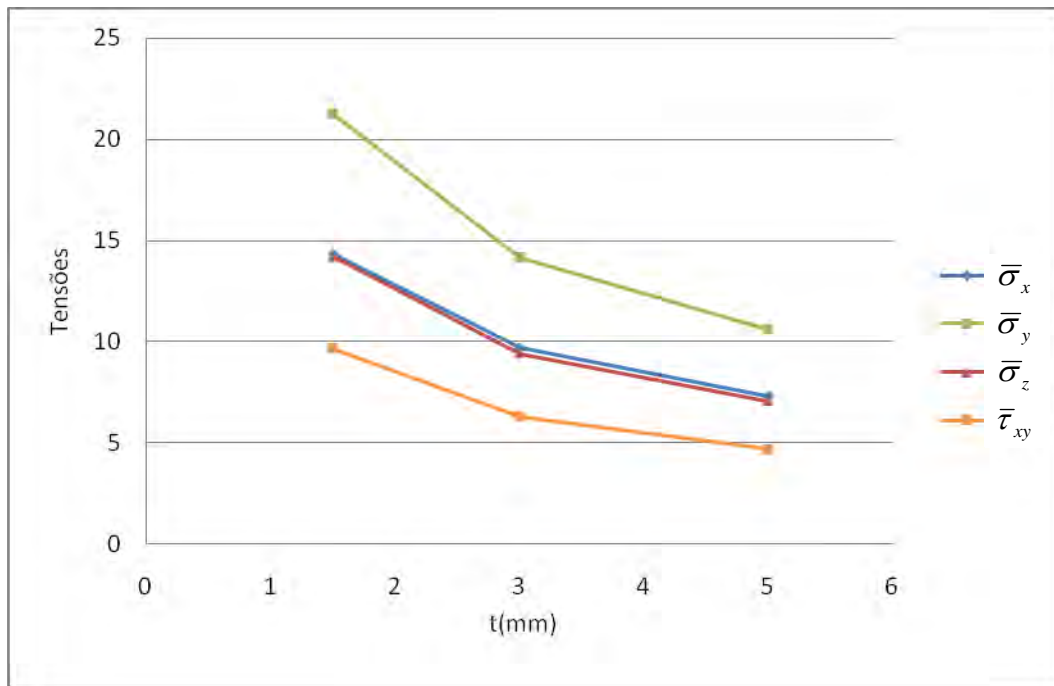


Figura 2.15. Efeito da espessura dos aderentes nas tensões normalizadas máximas nos bordos das juntas com  $L = 40$  mm.

Conclui-se portanto que as geometrias das juntas estudadas dão origem a diferentes níveis de tensões nos bordos que, em princípio, se relacionarão com as cargas de rotura experimentais das juntas. Todavia, essa relação só poderá ser definida através de análises que tenham em conta o comportamento plástico do adesivo e dos aderentes.

## 2.4. Análises elasto-plásticas das ligações

O objectivo destas análises era identificar um critério de rotura das ligações, o que exige que se reproduza correctamente o comportamento mecânico dos aderentes e do adesivo. No primeiro caso, usou-se a curva tensão-deformação medida em [Rasmussen 2001], representada na figura 2.16. Quanto ao adesivo, num projecto de Dissertação em curso foram medidas as curvas tensão-deformação de provetes maciços à tracção e à compressão, que as figuras 2.17 e 2.18 exemplificam. Estas incluem também as aproximações elasto-perfeitamente plásticas usadas nos modelos e que foram definidas impondo igual energia de deformação até ao primeiro pico de tensão.

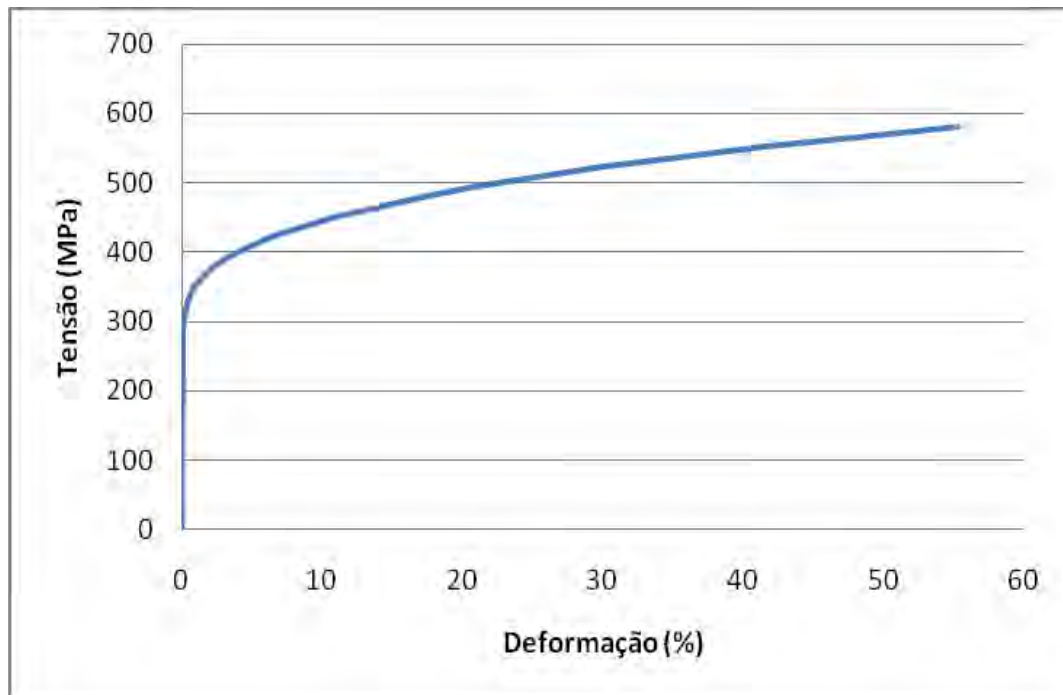


Figura 2.16. Curva tensão-deformação do aço AISI 304 [Rasmussen, 2001].

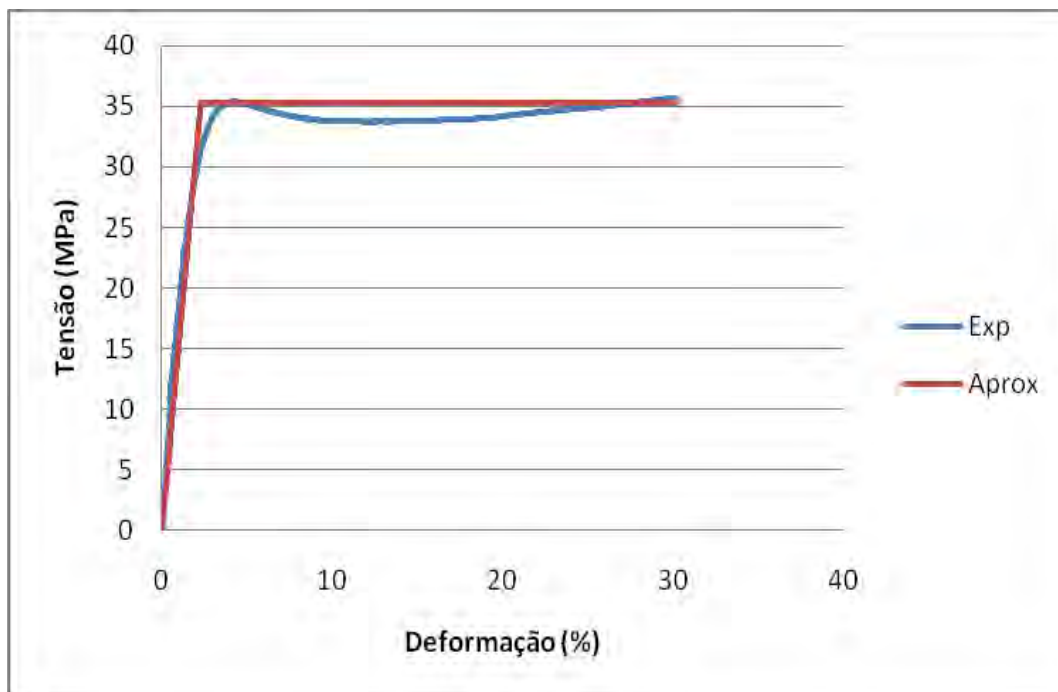


Figura 2.17. Exemplo de curva tensão-deformação do adesivo *Araldit Standard* à tracção e aproximação elasto-perfeitamente plástica.

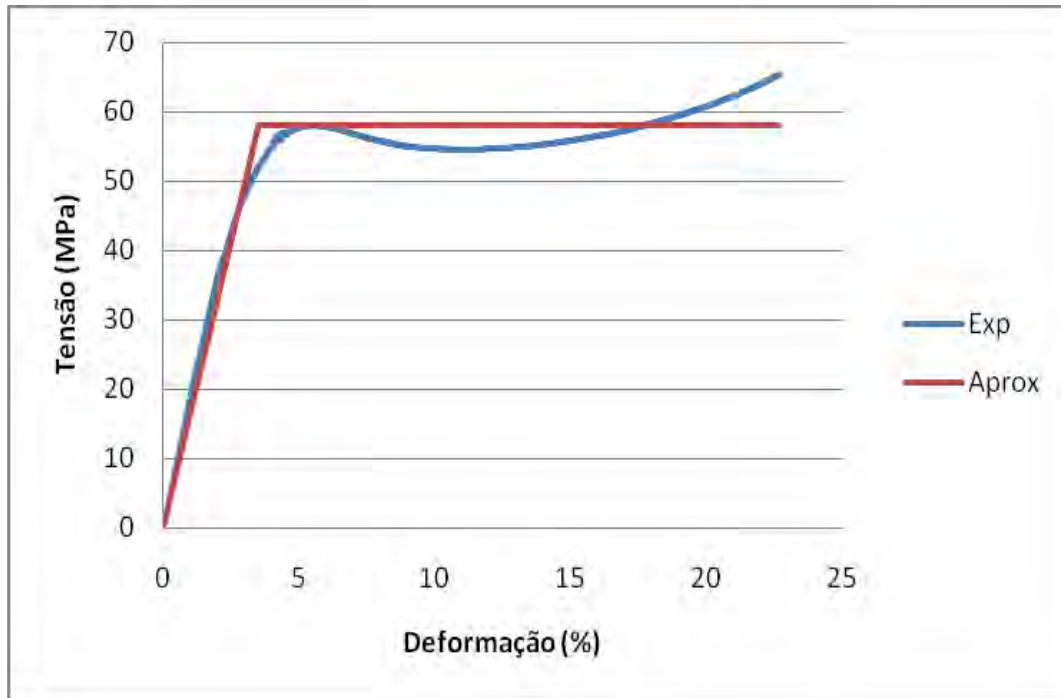


Figura 2.18. Exemplo de curva tensão-deformação do adesivo *Araldit Standard* à compressão e aproximação elasto-perfeitamente plástica.

No comportamento à compressão, ignorou-se a zona posterior ao primeiro pico, pois o aumento de tensões está associado ao embarrilamento do provete. Os valores médios obtidos para estas aproximações foram módulo de Young  $E = 1.55$  GPa, tensão de cedência à tracção  $\sigma_{0t} = 37.0$  MPa e tensão de cedência à compressão  $\sigma_{0c} = 59.2$  MPa. O modelo de cedência usado foi o de Drucker-Prager, segundo o qual

$$\frac{\sigma_{0c}}{\sigma_{0t}} = \frac{3 + \tan \beta}{3 - \tan \beta}, \quad \frac{\tau_0}{\sigma_{0t}} = \frac{3 + \tan \beta}{3\sqrt{3}} \quad (3)$$

Da primeira equação obtém-se  $\beta = 35^\circ$  e portanto uma tensão de cedência ao corte  $\tau_0 = 26.3$  MPa.

Os resultados destas simulações e as conclusões delas extraídas são apresentados no capítulo 3.4 em conjunto com os valores experimentais.

## 3. Trabalho experimental

### 3.1. Procedimentos

Os materiais e as dimensões dos provetes ensaiados foram idênticos aos usados nas simulações acima descritas, com excepção de um comprimento adicional de 30 mm em cada chapa para os mordentes da máquina de ensaios (figura 3.1).

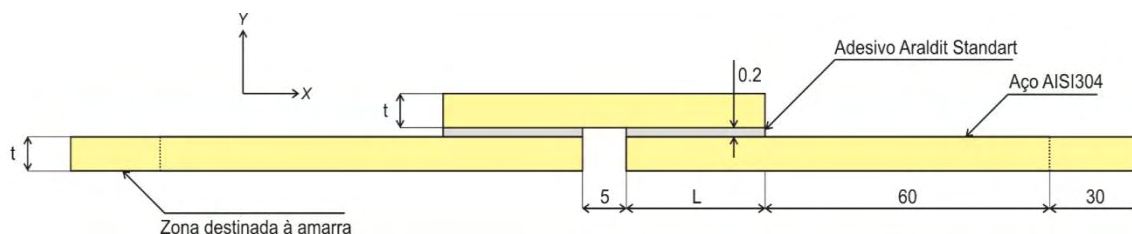


Figura 3.1. Geometria dos provetes ensaiados.

Antes da colagem, as superfícies de laminagem dos aderentes foram sujeitas a um ligeiro tratamento superficial. Inicialmente, aplicou-se lixa de água de granulometria 320. Em seguida, as superfícies foram limpas e desengorduradas com acetona comercial. As colagens foram cuidadosamente executadas, devido à necessidade de garantir bom alinhamento dos provetes e uma espessura da camada adesiva constante de 0.2 mm. Para isso foi concebido e fabricado o suporte em alumínio representado esquematicamente na figura 3.2. A cura do adesivo foi efectuada em estufa a 90 °C

durante 3 horas sob pressão exercida por um peso. Posteriormente removeram-se os excessos de cola com X-ato e lima.

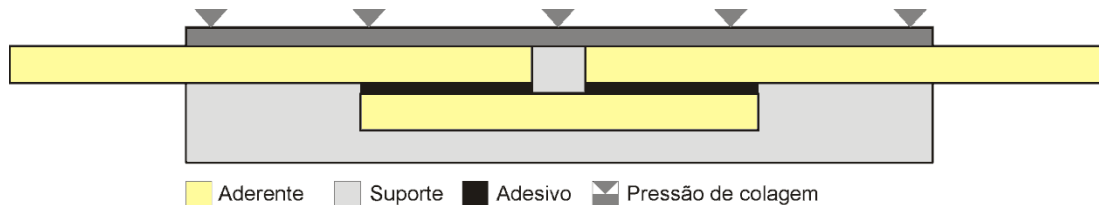


Figura 3.2. Representação esquemática da colagem de um provete.

Os ensaios foram executados na máquina Shimadzu® AG-50KNG do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (figura 3.3). A velocidade dos ensaios foi 0.5 mm/min.

Os deslocamentos foram medidos com um vídeoextensómetro (Messphysic), recorrendo para tal a marcas previamente coladas nos provetes (Figura 3.4). Estas marcas foram obtidas através de impressão laser de alta definição, de modo a garantir uma resolução inferior a 1.0  $\mu\text{m}$ . As marcas foram posicionadas a 15 mm dos topos da chapa de bissobreposição (figura 3.4). Na realidade, a escolha do posicionamento das marcas não foi linear, tendo sido experimentadas algumas distâncias antes de adoptar as posições definitivas. Por exemplo, com a maior sobreposição  $L = 40$  mm usada, verificou-se que a distância de 115 mm entre marcas implicava uma perda apreciável de resolução com as marcas normais. Logo, considerou-se aplicar as marcas sobre o aderente superior. Contudo, os ensaios mostraram deformações longitudinais negativas, associadas às deformações de flexão (figura 3.5), Finalmente, a impressão laser de alta definição das marcas viabilizou a medição à distância de 115 mm.



Figura 3.3. Fotografia de um ensaio.



Figura 3.4. Provete com marcas de leitura de deformação do videoextensômetro.

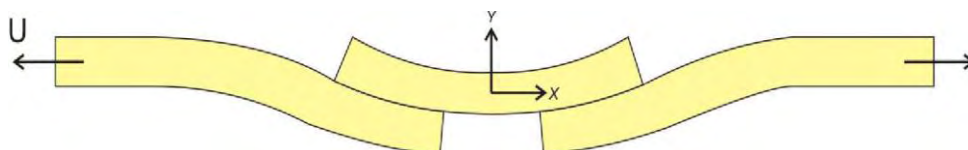


Figura 3.5. Representação da deformação de uma junta ensaiada.



## 3.2. Resultados experimentais e análise

### 3.2.1. Cargas de rotura experimentais

Para facilitar a análise, os resultados experimentais obtidos para a carga de rotura são apresentados de duas formas:

- em função do comprimento de sobreposição  $L$  para as várias espessuras do aderente  $t$  nas figuras 3.6 a 3.8;
- em função de  $t$  para os vários  $L$  nas figuras 3.9 a 3.11.

As referidas figuras mostram os pontos correspondentes aos vários provetes ensaiados, bem como a linha de valores médios. Finalmente, a figura 3.12 e a tabela 3.1 resumem os valores médios e desvios padrão de todos os casos.

A dispersão nos resultados foi considerável (tabela 3.1), o que se compreende pelo facto do provete envolver duas juntas coladas de sobreposição. Não obstante, da análise das figuras 3.6 a 3.12 pode-se constatar que, de um modo geral, a carga de rotura aumenta com  $t$  e  $L$ , como seria de esperar. Há, porém, uma anomalia nos resultados das juntas com  $t = 3$  mm e  $L = 40$  mm (figuras 3.7 e 3.11), que apresentaram cargas de rotura mais baixas do que o previsto. Esta anomalia poderá dever-se ao lote de adesivo utilizado se ter degradado, uma vez que se recorreu a várias embalagens durante os ensaios. Também é de notar que a influência de  $t$  na carga de rotura tende a diminuir, principalmente a partir de  $t = 3$  mm (figuras 3.9 e 3.10). Isto deve-se ao facto de os aderentes praticamente não sofrerem flexão a partir desta espessura. Por seu turno, o efeito de  $L$  foi quase linear para  $t = 1.5$  mm, o que é um resultado algo surpreendente, e sugere também uma anomalia confirmada em 3.2.2. Os valores excepcionalmente elevados para  $L = 40$  mm podem ter resultado de uma menor eficácia na remoção dos excessos de cola nos bordos.

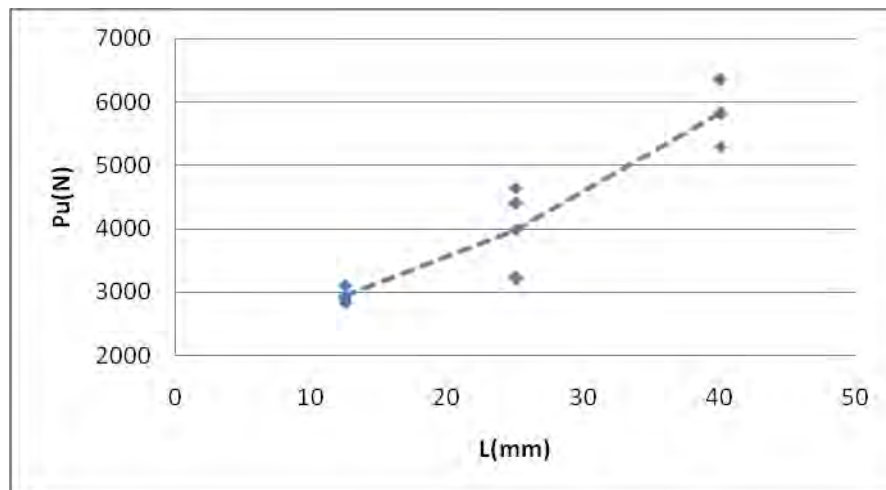


Figura 3.6. Efeito de  $L$  nas cargas de rotura experimentais para juntas com  $t = 1.5$  mm.

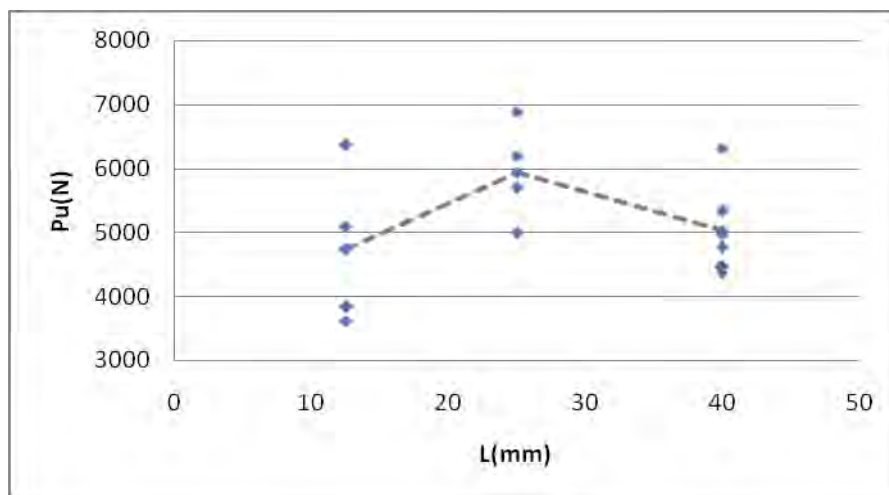


Figura 3.7. Efeito de  $L$  nas cargas de rotura experimentais para juntas com  $t = 3$  mm.

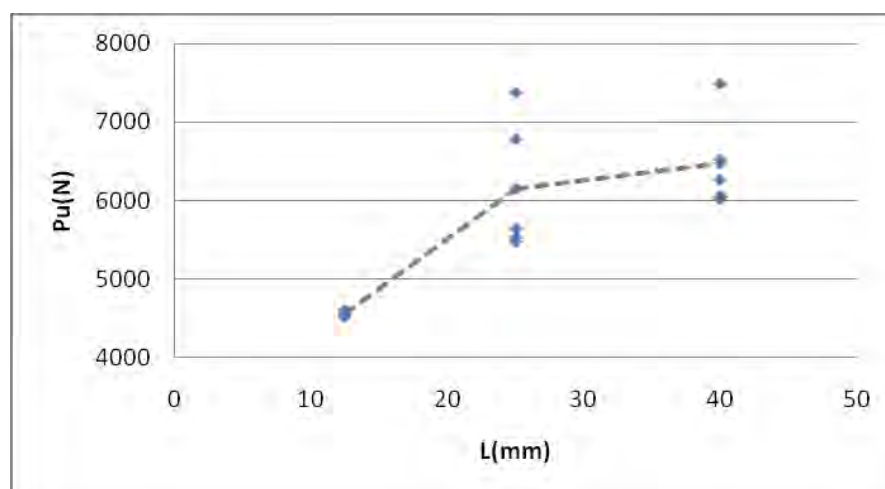


Figura 3.8. Efeito de  $L$  nas cargas de rotura experimentais para juntas com  $t = 5$  mm.

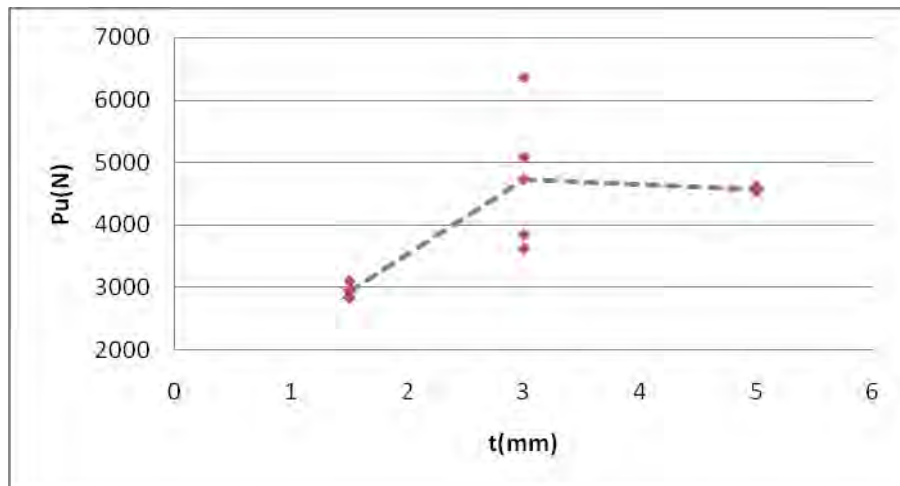


Figura 3.9. Efeito de  $t$  nas cargas de rotura experimentais para juntas com  $L = 12.5$  mm.

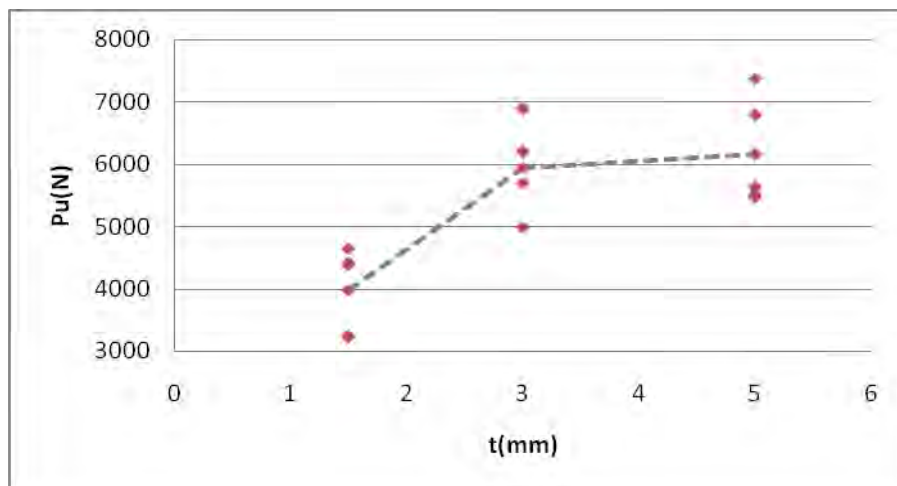


Figura 3.10. Efeito de  $t$  nas cargas de rotura experimentais para juntas com  $L = 25$  mm.

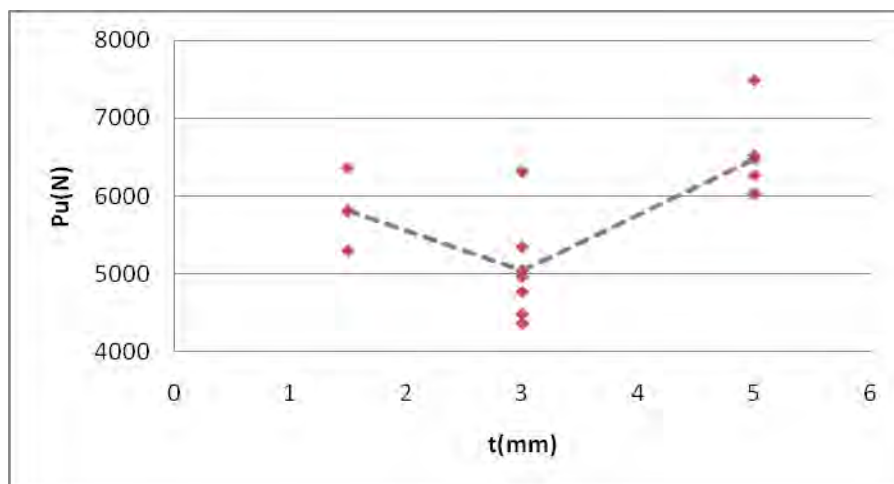


Figura 3.11. Efeito de  $t$  nas cargas de rotura experimentais para juntas com  $L = 40$  mm.

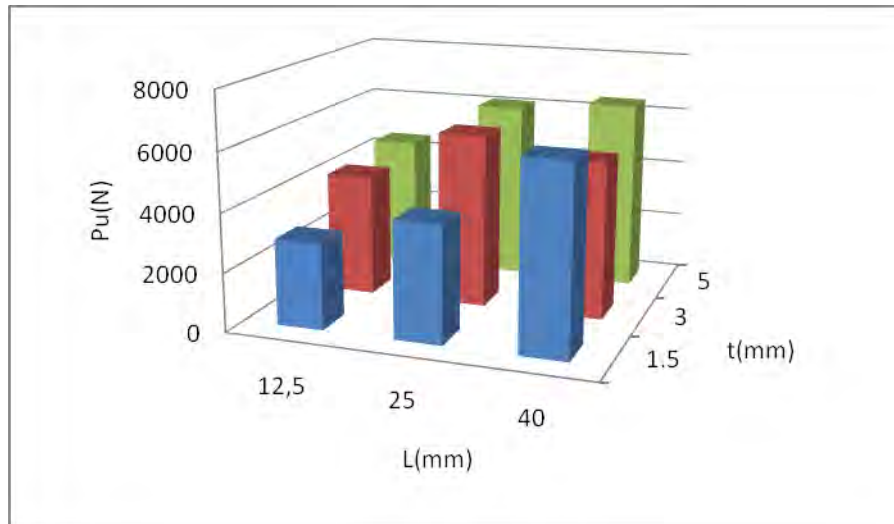


Figura 3.12. Gráfico das cargas de rotura médias experimentais para todos os comprimentos de sobreposição ( $L$ ) e espessuras do aderente ( $t$ ).

Tabela 3.1. Resumo das médias e desvios padrão (DP) para as cargas de rotura experimentais.

$L$ (mm)		12.5		25.0		40.0	
$t$ (mm)		$\bar{P}_u$ (N)	DP (%)	$\bar{P}_u$ (N)	DP (%)	$\bar{P}_u$ (N)	DP (%)
	1.5	2946	3.65	3982	17.42	6333	17.58
	3.0	4188	18.95	5941	13.45	5347	12.80
	5.0	4559	0.96	6156	14.15	6473	9.37

### 3.2.2. Tensões de rotura ao corte médias experimentais

As tensões de rotura ao corte médias ao longo da sobreposição, ou seja

$$\bar{\tau}_u = \frac{P_u}{bL} \quad (4)$$

dão outra perspectiva de análise aos resultados experimentais, como se constata nas figuras 3.13 a 3.19. Assim, é possível verificar que, apesar de  $P_u$  aumentar com  $L$ ,  $\bar{\tau}_u$  geralmente diminui (figuras 3.13 a 3.15), o que traduz de forma mais clara a eficiência decrescente do aumento da área resistente da junta. Além disso, confirma-se a anomalia nos resultados dos ensaios de juntas com  $t = 1.5$  mm e  $L = 40$  mm (figura 3.13). Também pelas razões já referidas em 3.2.1, o acréscimo de  $t$  deixa de ter efeito na resistência da junta acima de 3 mm (figuras 3.16 a 3.18). Mais uma vez, tornam-se evidentes as anomalias dos resultados para  $t = 1.5$  e 3 mm com  $L = 40$  mm (figura 3.18).

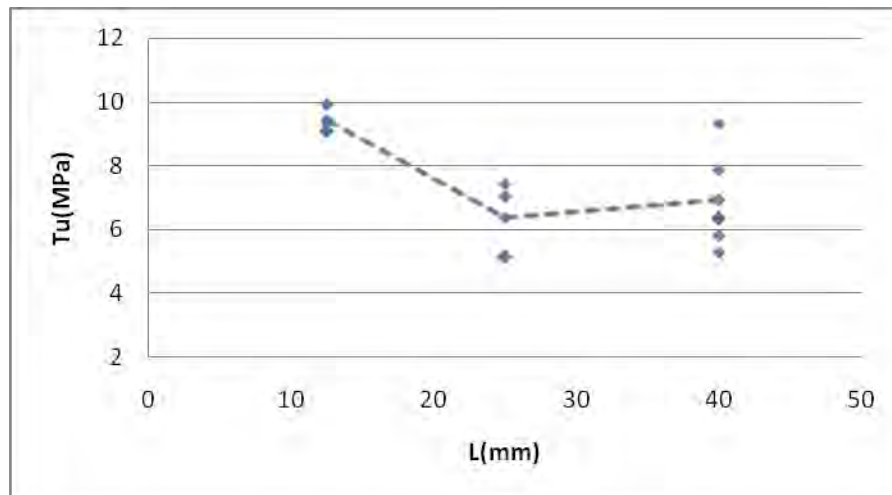


Figura 3.13. Efeito de  $L$  nas tensões de ruptura ao corte médias experimentais para juntas com  $t = 1.5$  mm.

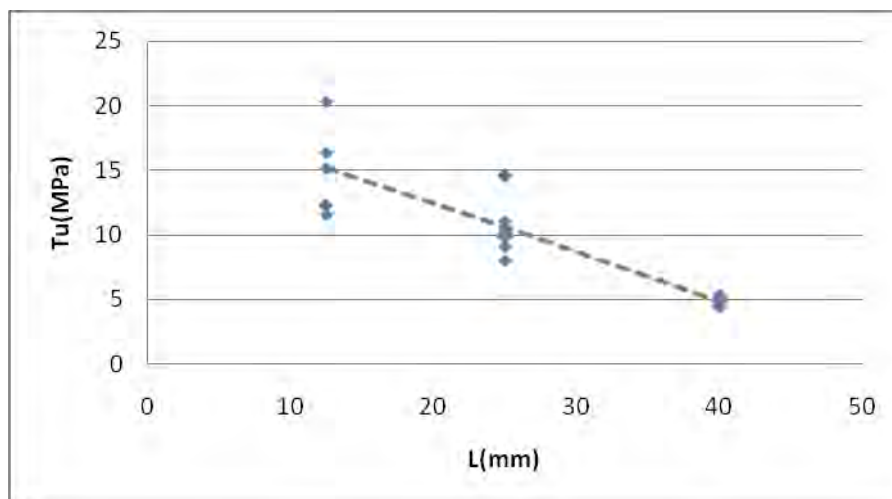


Figura 3.14. Efeito de  $L$  nas tensões de ruptura ao corte médias experimentais para juntas com  $t = 3$  mm.

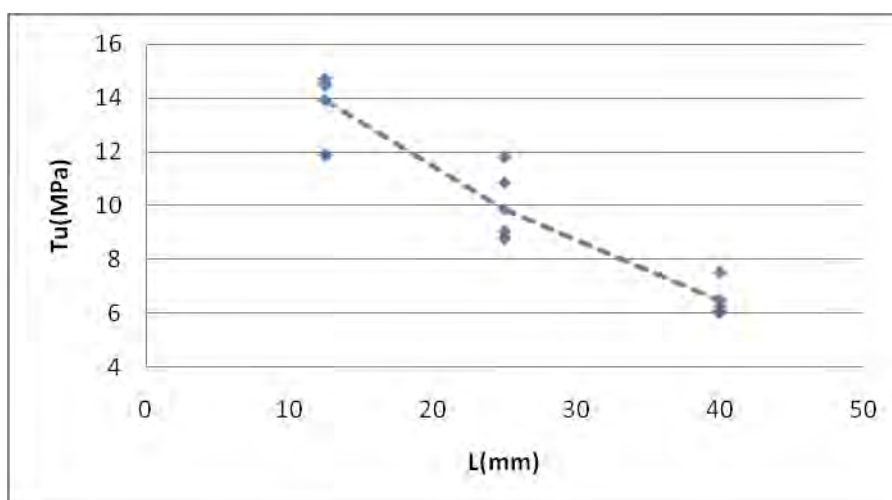


Figura 3.15. Efeito de  $L$  nas tensões de ruptura ao corte médias experimentais para juntas com  $t = 5$  mm.

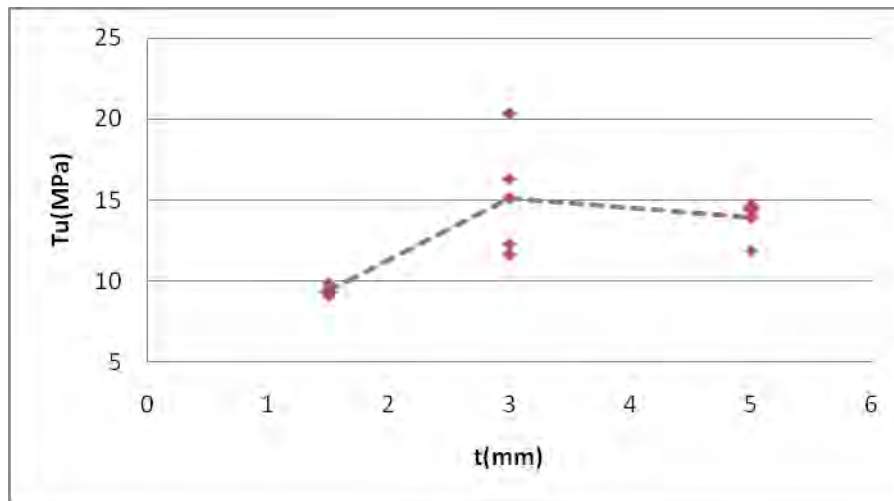


Figura 3.16. Efeito de  $t$  nas tensões de ruptura ao corte médias para juntas com  $L = 12.5$  mm.

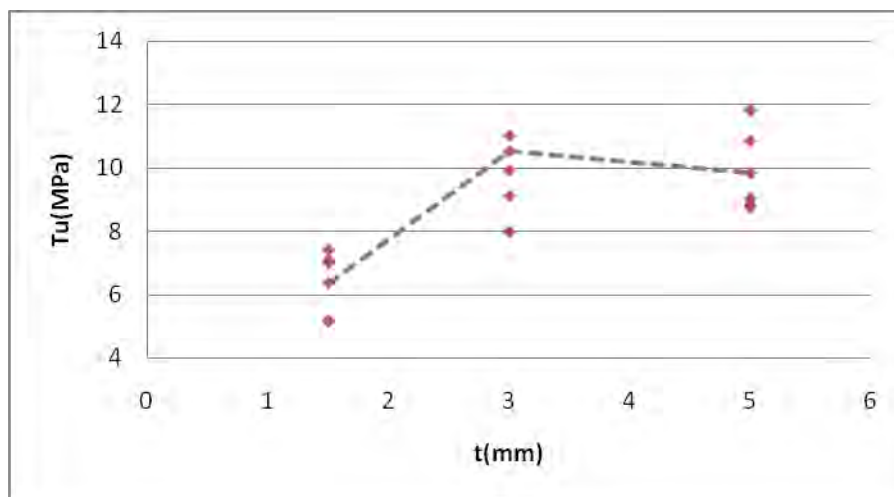


Figura 3.17. Efeito de  $t$  nas tensões de ruptura ao corte médias para juntas com  $L = 25$  mm.

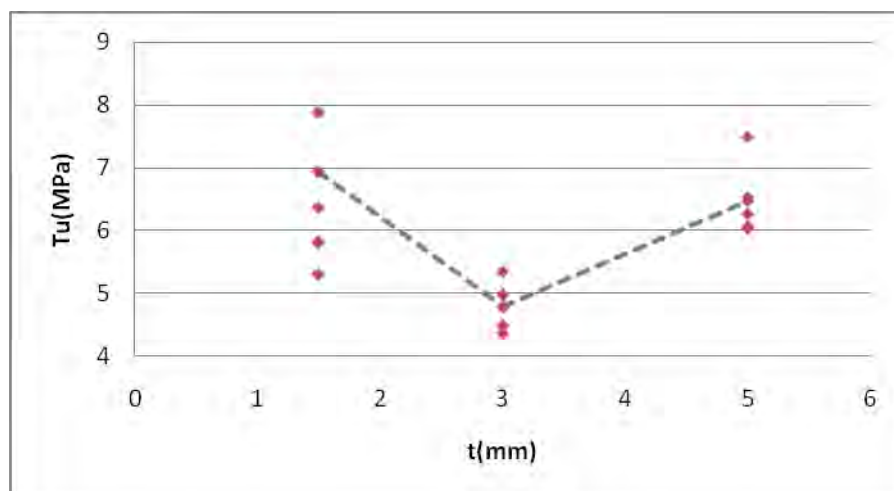


Figura 3.18. Efeito de  $t$  nas tensões de ruptura ao corte médias para juntas com  $L = 40$  mm.

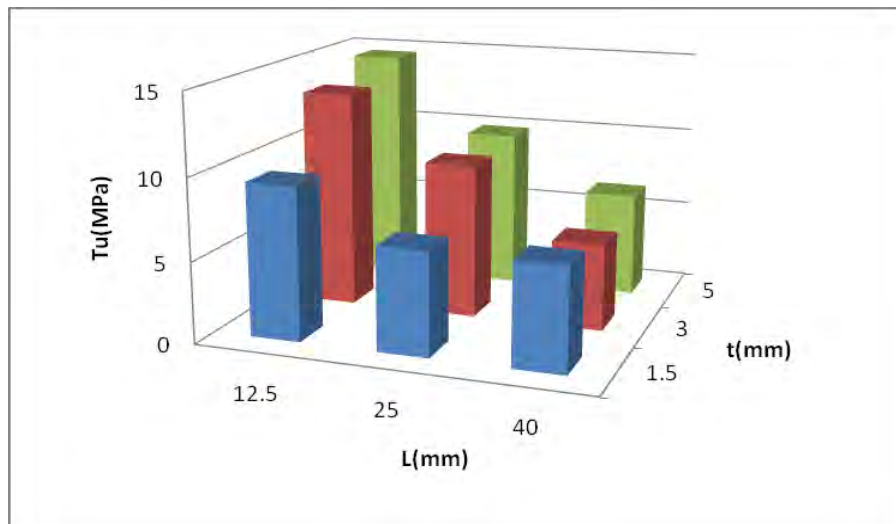


Figura 3.19. Gráfico dos valores médios das tensões de ruptura ao corte médias experimentais para todos os comprimentos de sobreposição ( $L$ ) e espessuras do aderente ( $t$ ).

### 3.2.3. Superfícies de ruptura

Como se pode verificar nas figuras 3.20 a 3.22, a ruptura foi sempre interfacial ou adesiva, embora a linha de ruptura tenha por vezes mudado de interface através de uma ruptura coesiva da cola. Este modo de ruptura já tinha ocorrido em juntas de sobreposição simples com os mesmos aderentes e adesivo usados neste estudo [Morais e outros 2007]



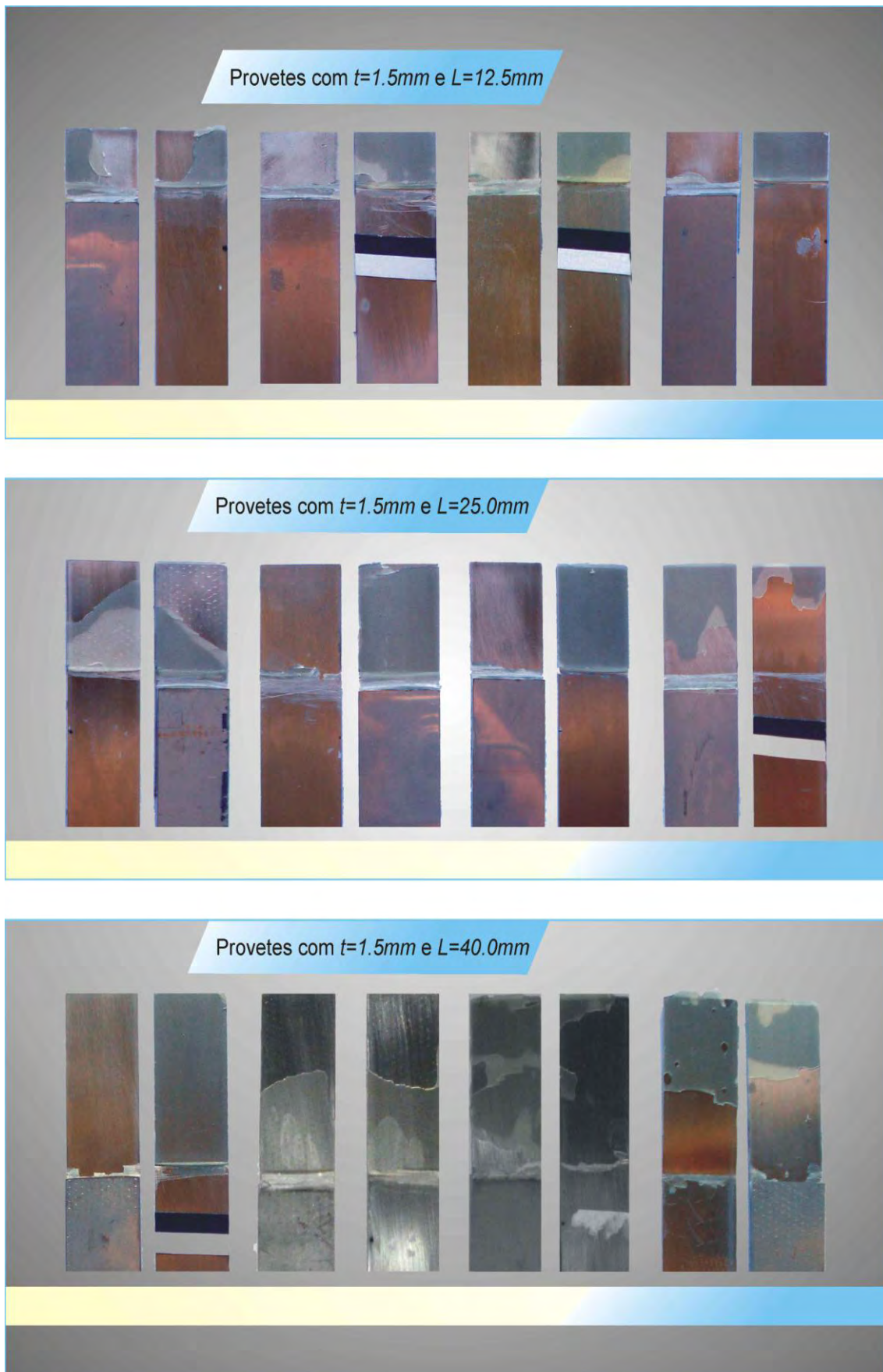


Figura 3.20. Fotografias de algumas superfícies de rotura de juntas com  $t=1.5\text{ mm}$ .



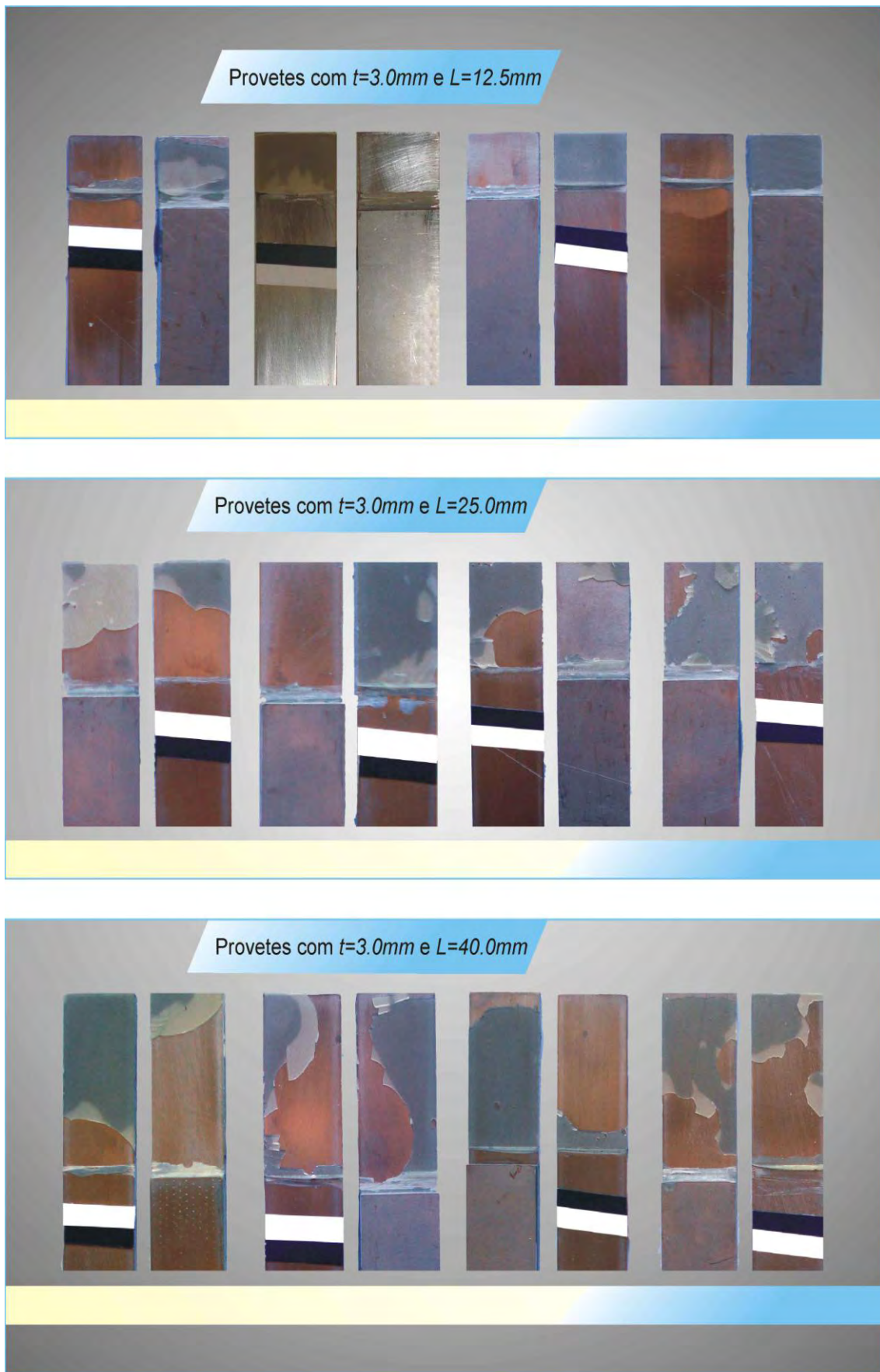


Figura 3.21. Fotografias de algumas superfícies de rotura de juntas com  $t = 3\text{ mm}$ .

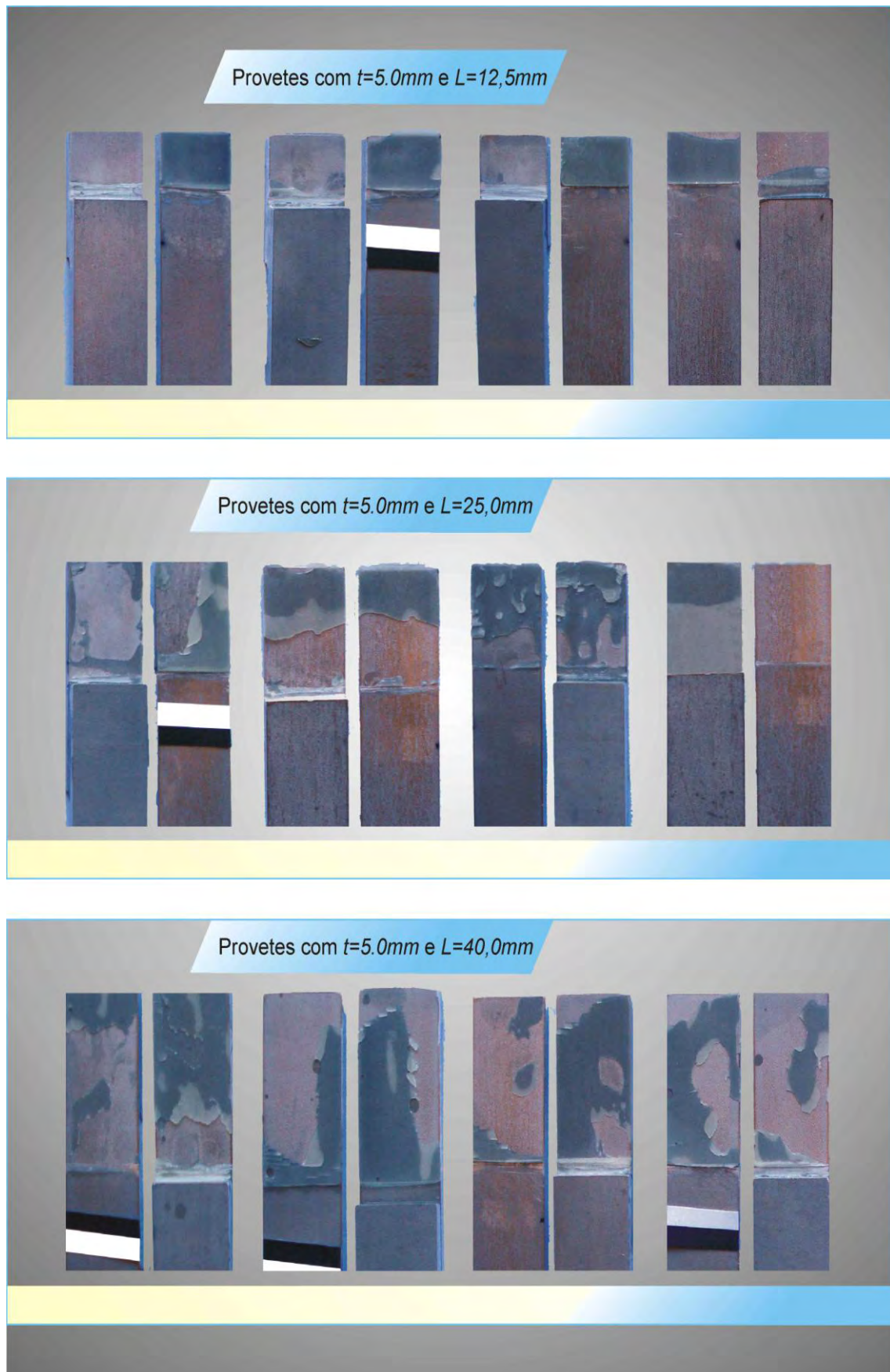


Figura 3.22. Fotografias de algumas superfícies de rotura de juntas com  $t = 5 \text{ mm}$ .

### 3.3. Comparação modelos numéricos – resultados experimentais

As figuras 3.23 a 3.31 comparam as curvas carga-deslocamento experimentais com as previsões dos modelos de elementos finitos (EF) com análise elasto-plástica (ver capítulo 2.4). Para além da dispersão estatística já mencionada, há algumas discrepâncias significativas entre as curvas previstas e as experimentais que se devem essencialmente a três factores:

- as dificuldades em garantir sempre a mesma distância entre marcas de medição dos deslocamentos com o vídeoextensómetro;
- as imperfeições nas juntas, tais como empenamentos das chapas, e o comportamento diferente do adesivo nas duas sobreposições;
- a utilização de uma aproximação elasto-perfeitamente plástica às curvas tensão-deformação à tracção e compressão do adesivo, que, obviamente, não teve em conta o comportamento real ao corte nem o processo de dano gradual.

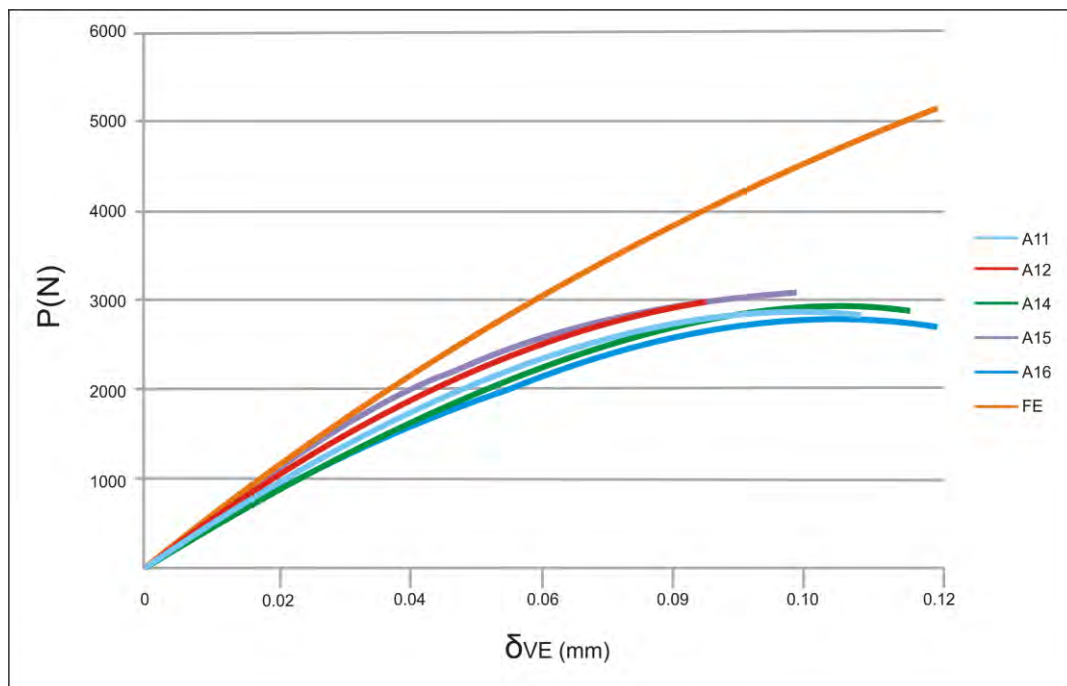


Figura 3.23. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 1.5$  mm e  $L = 12.5$  mm.



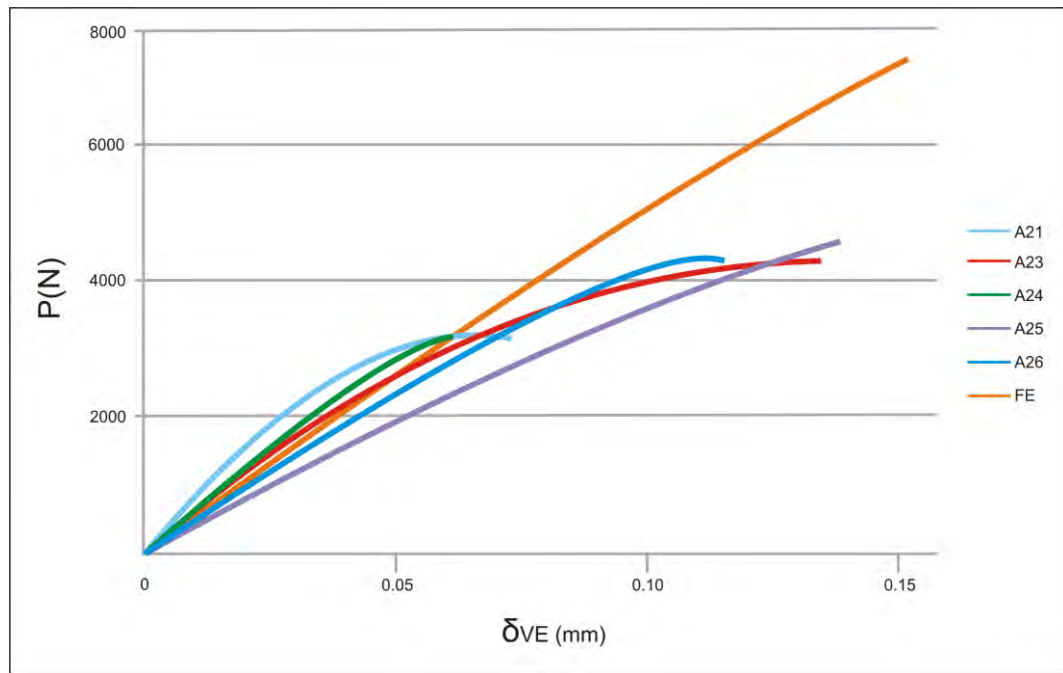


Figura 3.24. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 1.5$  mm e  $L = 25$  mm.

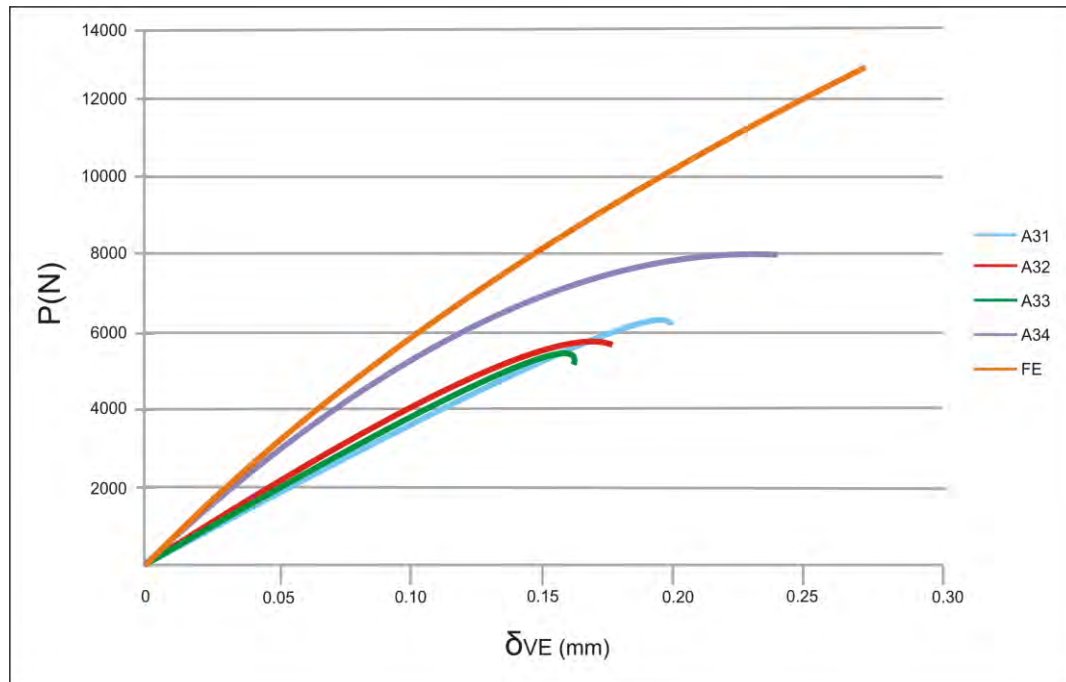


Figura 3.25. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 1.5$  mm e  $L = 40$  mm.

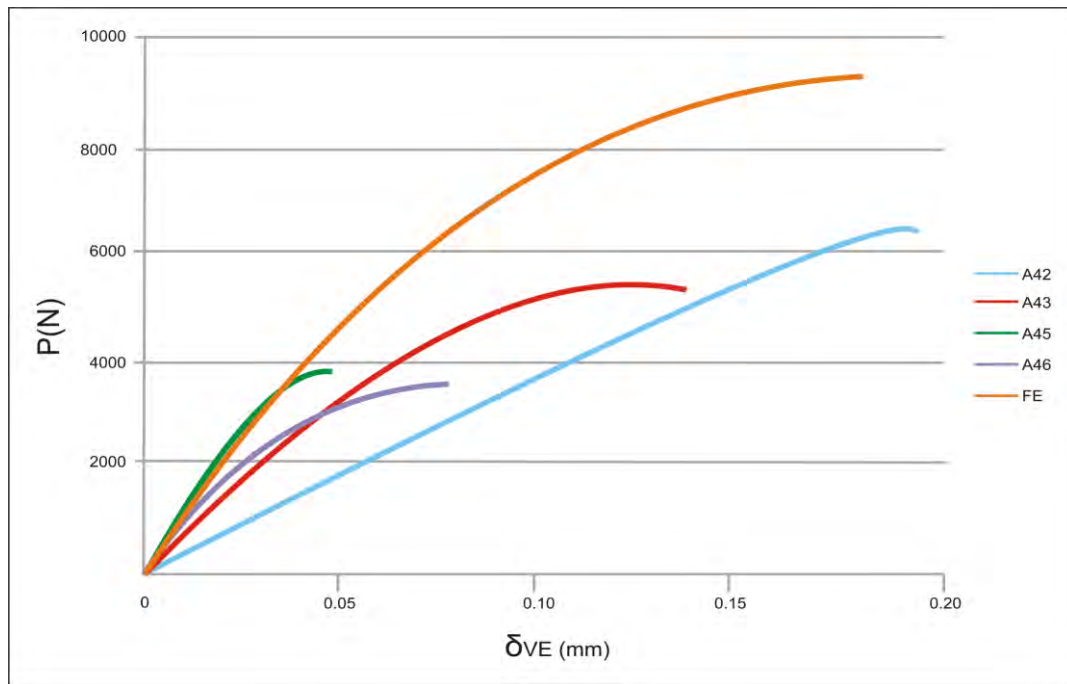


Figura 3.26. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 3$  mm e  $L = 12.5$  mm.

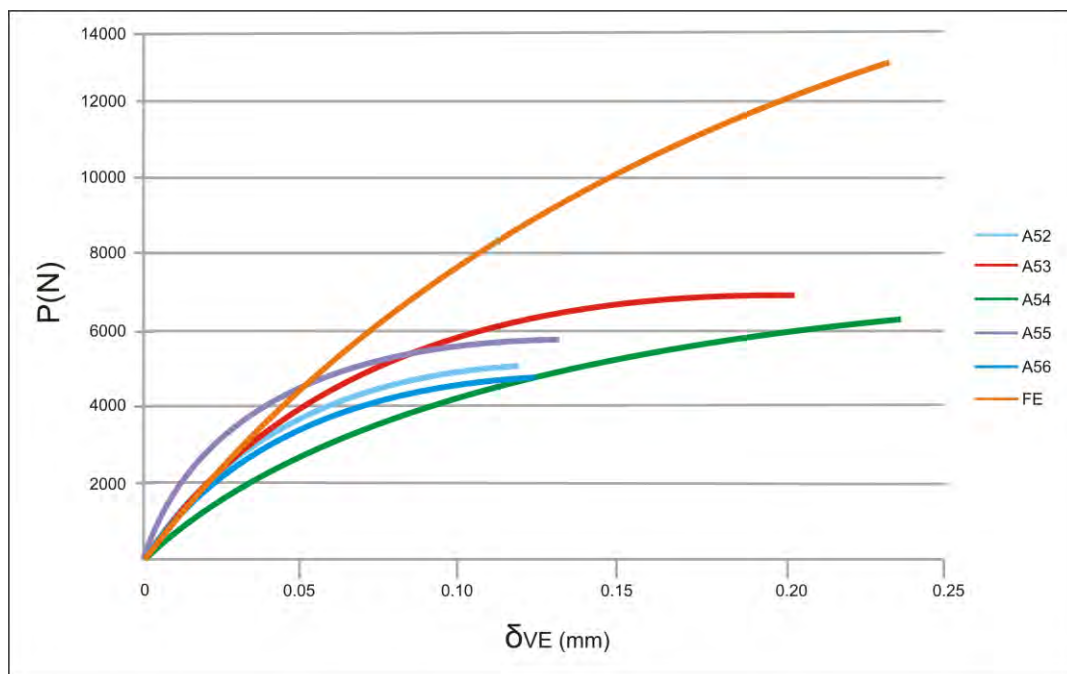


Figura 3.27. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 3$  mm e  $L = 25$  mm.

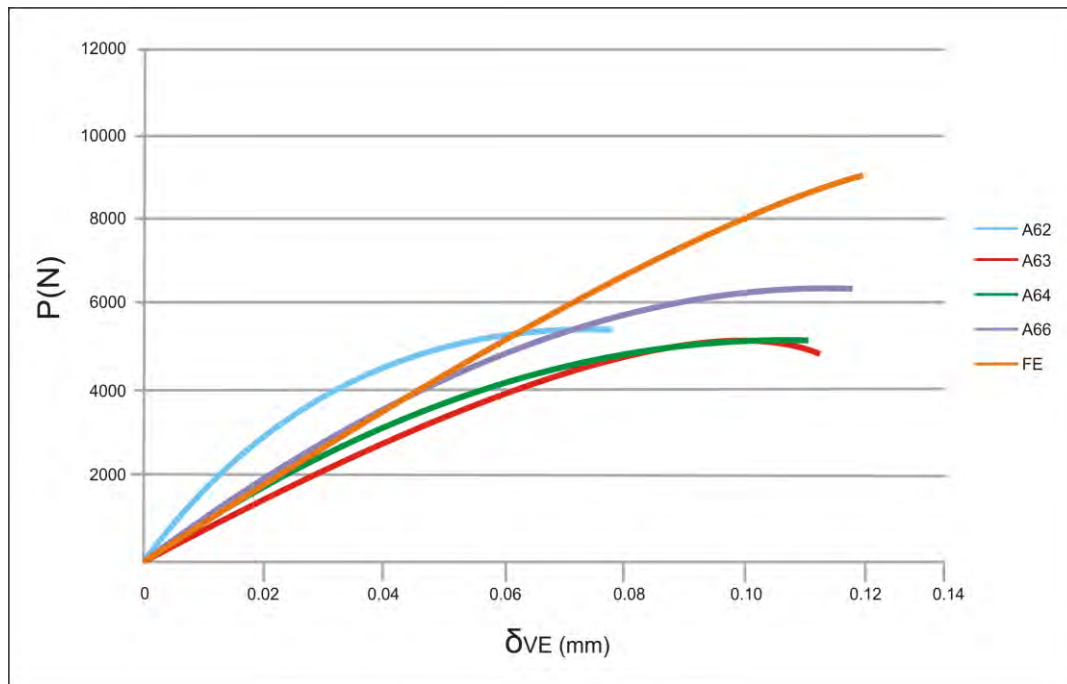


Figura 3.28. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 3$  mm e  $L = 40$  mm.

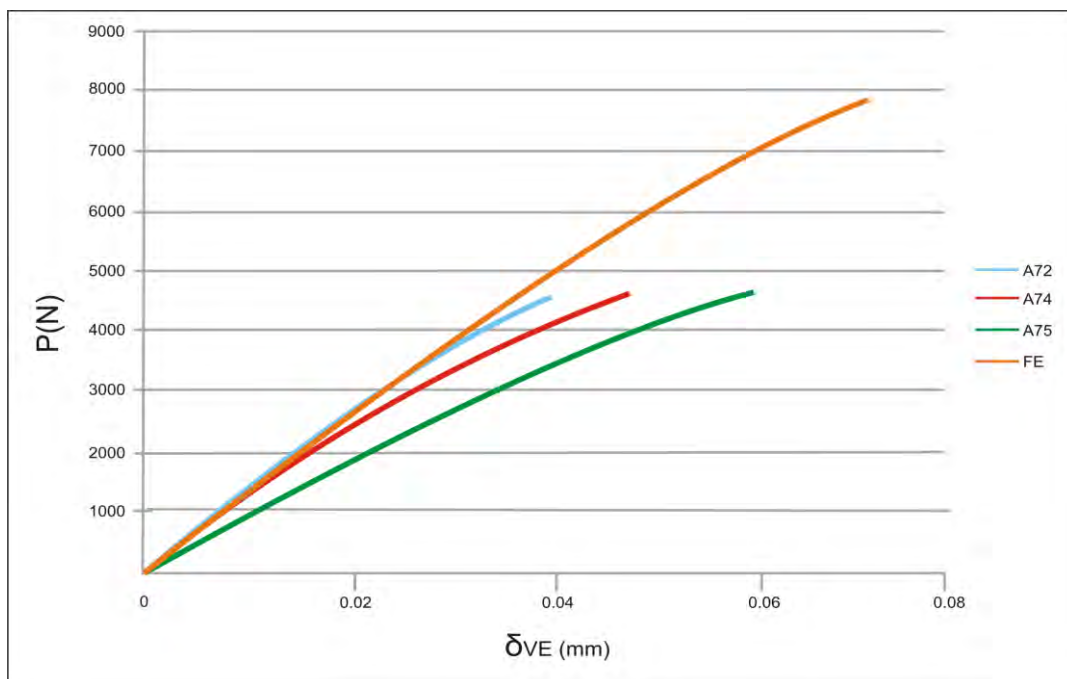


Figura 3.29. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 5$  mm e  $L = 12.5$  mm.

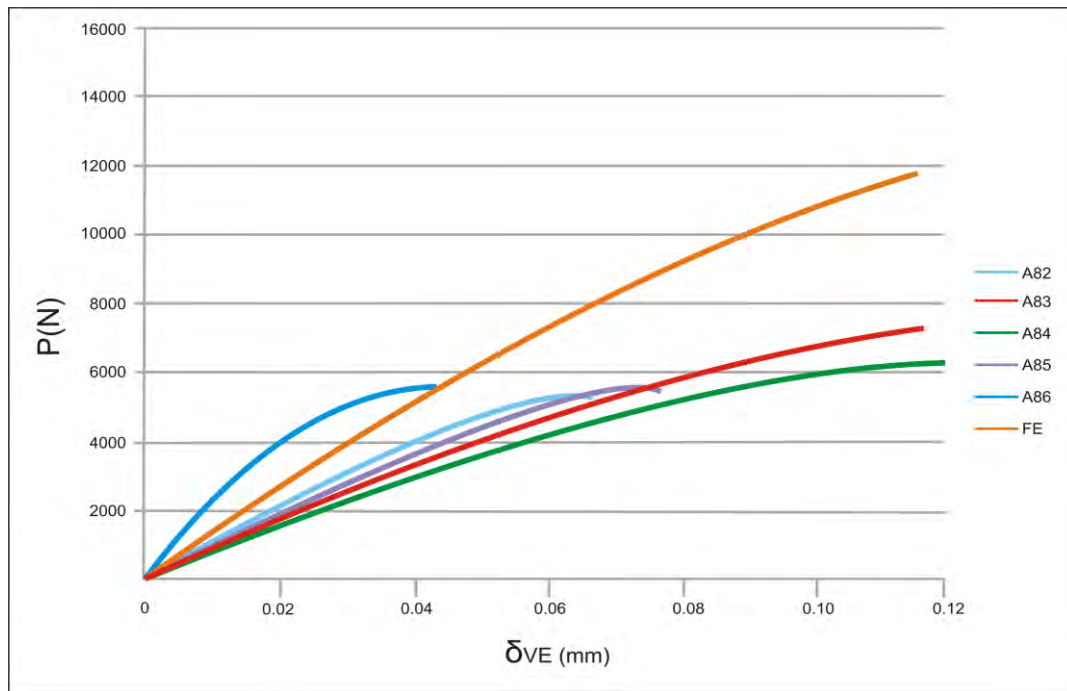


Figura 3.30. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 5$  mm e  $L = 25$  mm.

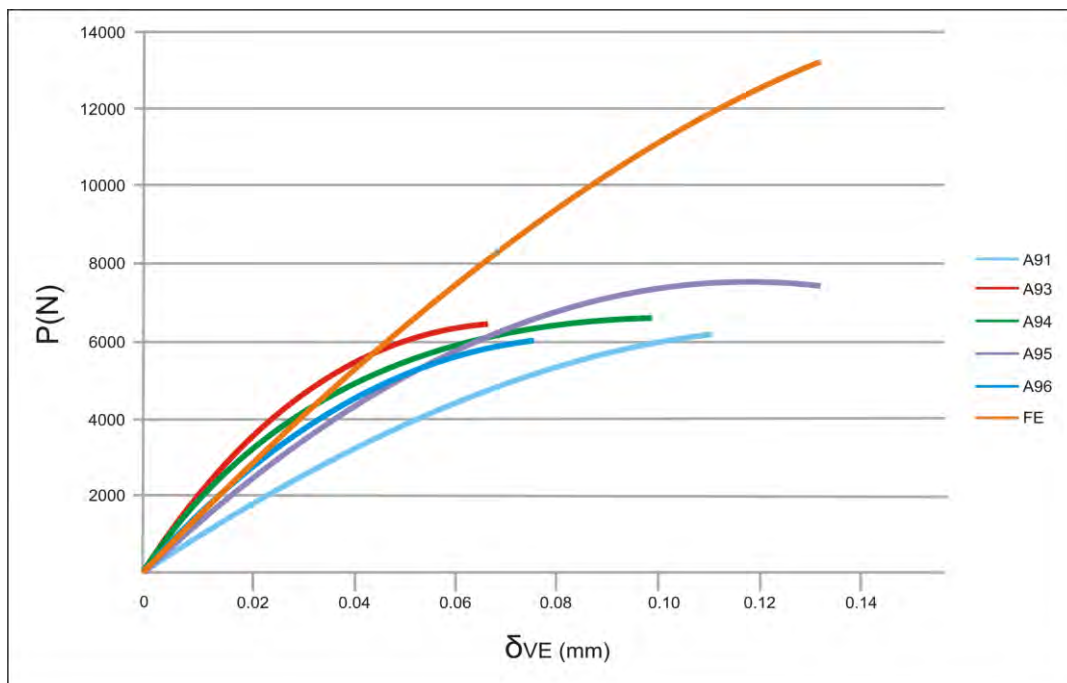


Figura 3.31. Curvas carga - deslocamento obtidas nos ensaios experimentais e modelos de elementos finitos com análise elasto-plástica para juntas com  $t = 5$  mm e  $L = 40$  mm.

Posteriormente, foram estudadas as distribuições de tensões e deformações obtidas pelos modelos numéricos (figuras 3.32 a 3.39) para as cargas de rotura médias experimentais (ver tabela 3.1). É de salientar que o perfil das curvas é parcialmente afectado pela plastificação local do adesivo, mas também pelo facto de terem sido usadas as coordenadas iniciais dos pontos de Gauss. De qualquer forma, surge uma diferença significativa em relação às análises lineares elásticas (figuras 2.8 a 2.11): a tensão de corte deixa de ter o valor máximo no bordo interno da junta, o que se deve à cedência sob tensões multiaxiais. Não obstante, as deformações são máximas no referido bordo (figuras 3.36 a 3.39). Verifica-se também que os picos das tensões normais  $\sigma_y$  se aproximam da tensão de ruptura à tracção (figura 2.17). Não obstante, as deformações de corte são consideravelmente mais elevadas do que as de tracção.

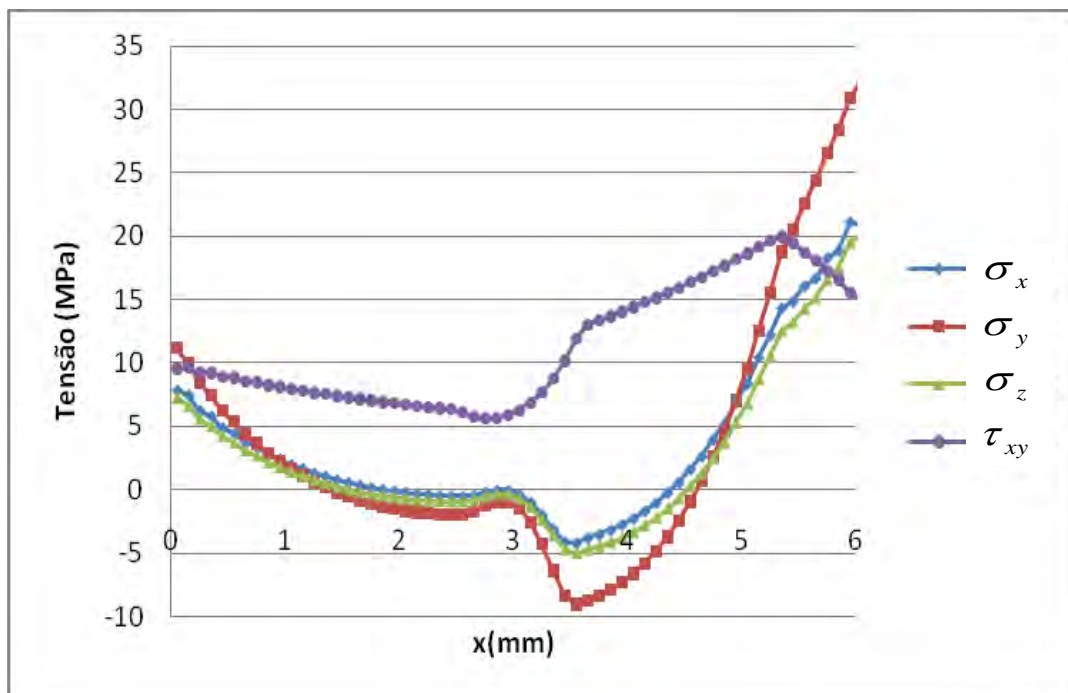


Figura 3.32. Distribuições das tensões ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 1.5$  mm e  $L = 12.5$  mm, obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.



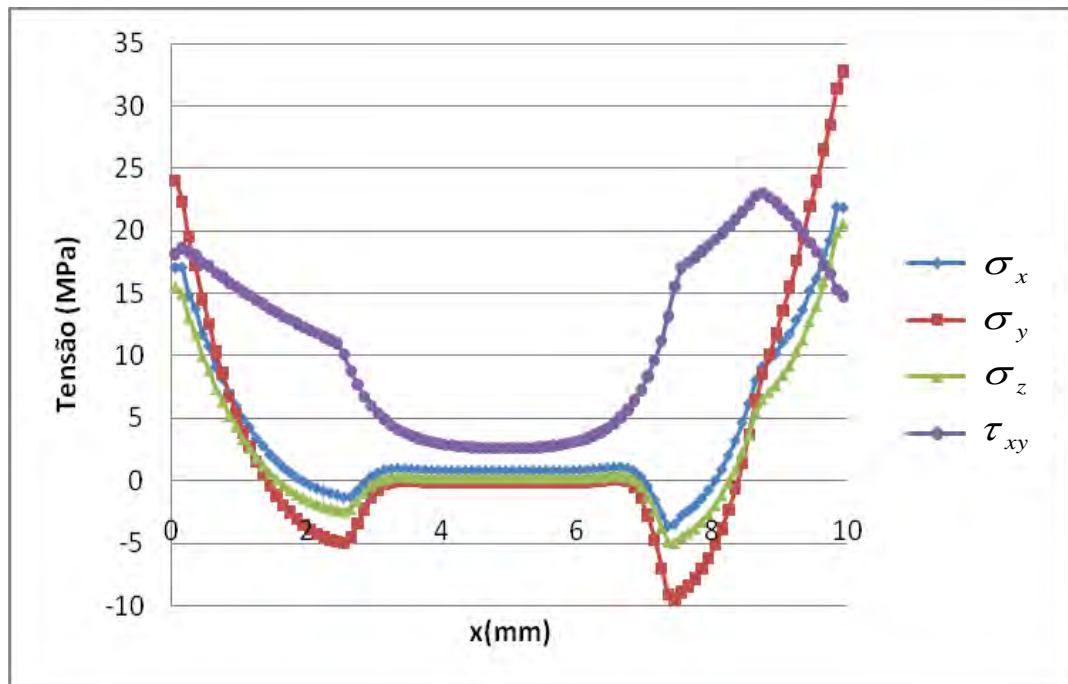


Figura 3.33. Distribuições das tensões ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 1.5$  mm e  $L = 40$  mm, obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.

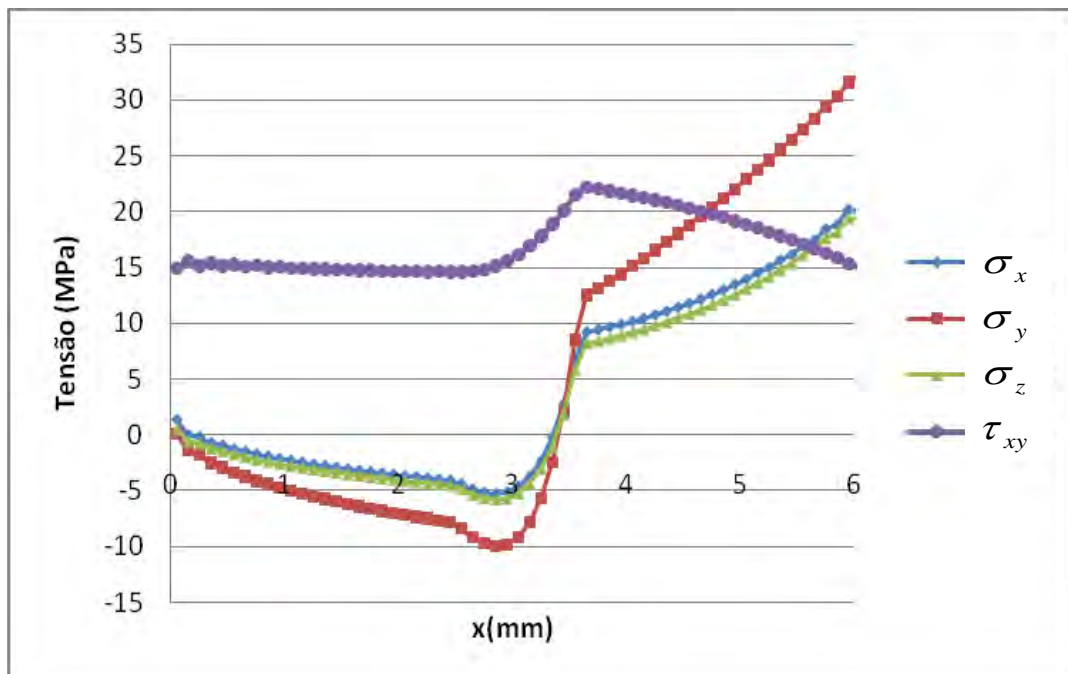


Figura 3.34. Distribuições das tensões ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 5$  mm e  $L = 12.5$  mm, obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.

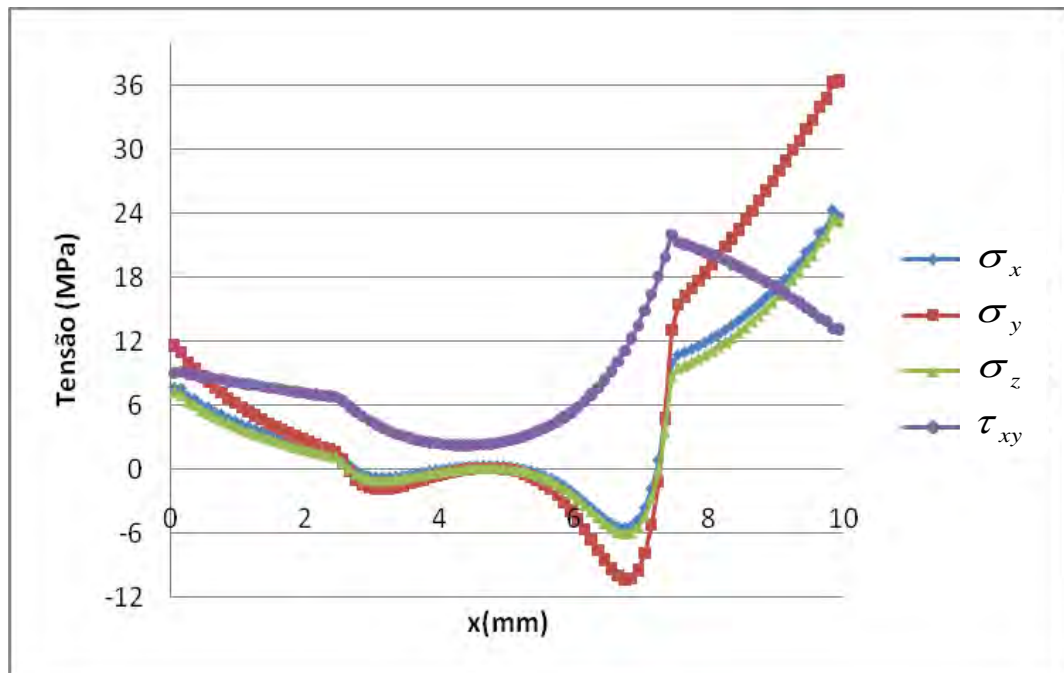


Figura 3.35. Distribuições das tensões ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 5$  mm e  $L = 40$  mm, obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.

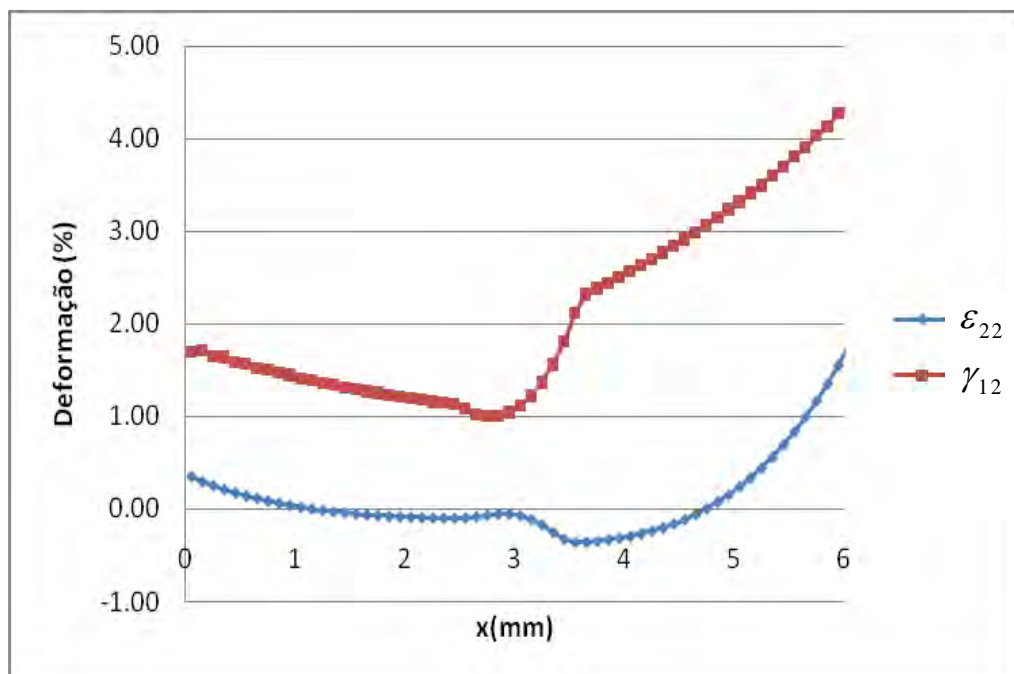


Figura 3.36. Distribuições das deformações ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 1.5$  mm e  $L = 12.5$  mm, obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.

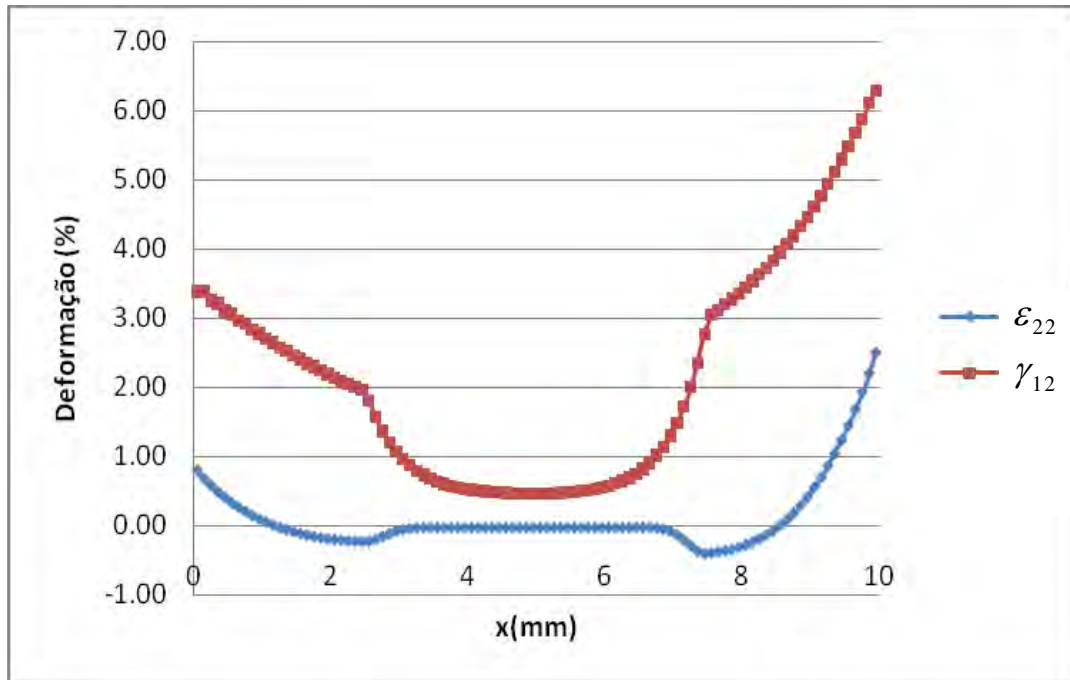


Figura 3.37. Distribuições das deformações ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 1.5$  mm e  $L = 40$  mm, obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.

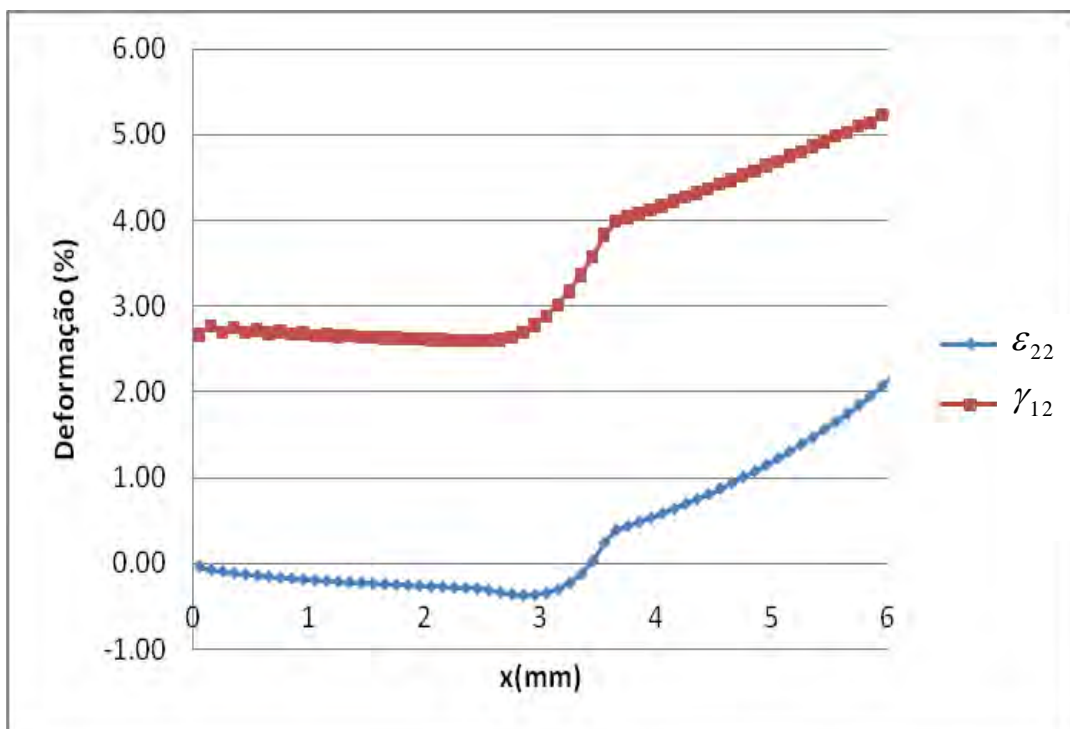


Figura 3.38. Distribuições das deformações ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 5$  mm e  $L = 12.5$  mm, obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.

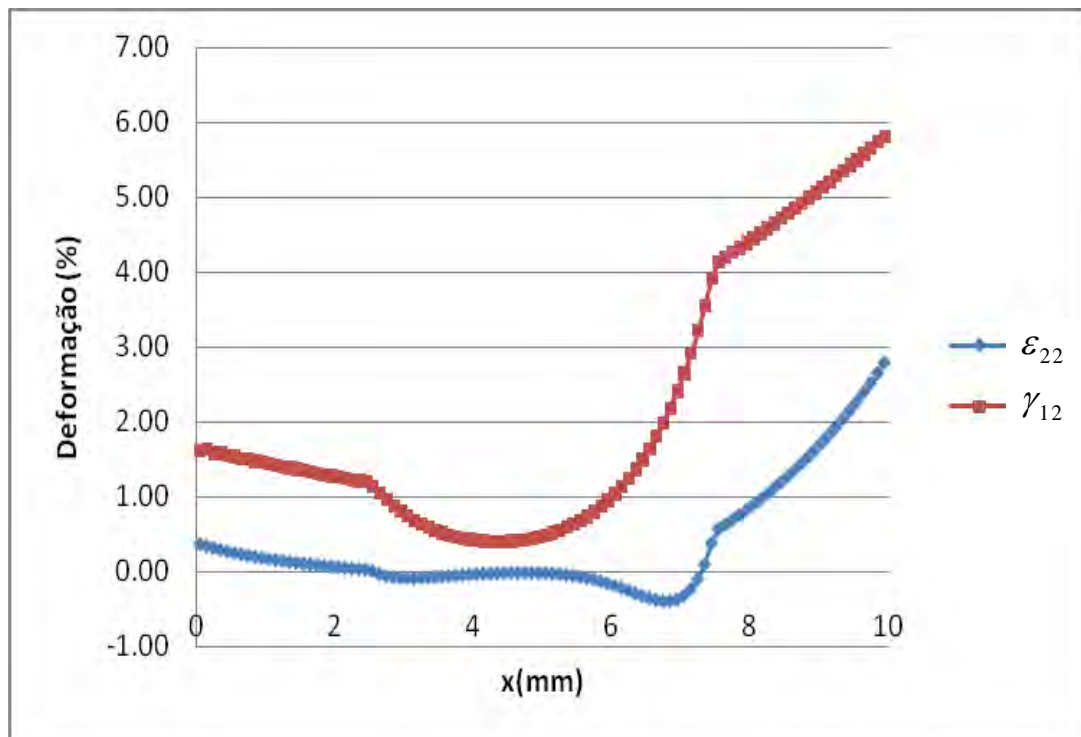


Figura 3.39. Distribuições das deformações ao longo da sobreposição de uma junta com  $t = 5$  mm e  $L = 40$  mm obtidas por modelos de EF com análises elasto-plásticas para a carga de rotura experimental média.

Finalmente, procurou-se identificar um critério de rotura baseado em deformações, face à aproximação elasto-plástica adoptada. Assim, obtiveram-se as deformações de tracção  $\epsilon_y$  e de corte  $\gamma_{xy}$  dos modelos EF para as cargas médias de rotura experimentais das várias juntas ensaiadas (figuras 3.40 e 3.41). Todavia, os resultados não são conclusivos, o que explica pelas mesmas razões já referidas aquando da comparação das curvas carga-deslocamento experimentais com as numéricas. De facto, não é claro qual das deformações tem um papel preponderante na rotura das juntas, ou se deveria ser usada uma deformação equivalente. De qualquer forma, os resultados indicam que a rotura da maioria das juntas com  $t = 1.5$  e  $5$  mm poderia ser prevista com razoável rigor impondo uma deformação limite  $\epsilon_u \approx 2\%$  ou  $\gamma_u \approx 5\%$ . Estes valores, que parecem muito baixos face à ductilidade do adesivo em ensaios de tracção (figura 2.17), devem-se seguramente à rotura adesiva observada.

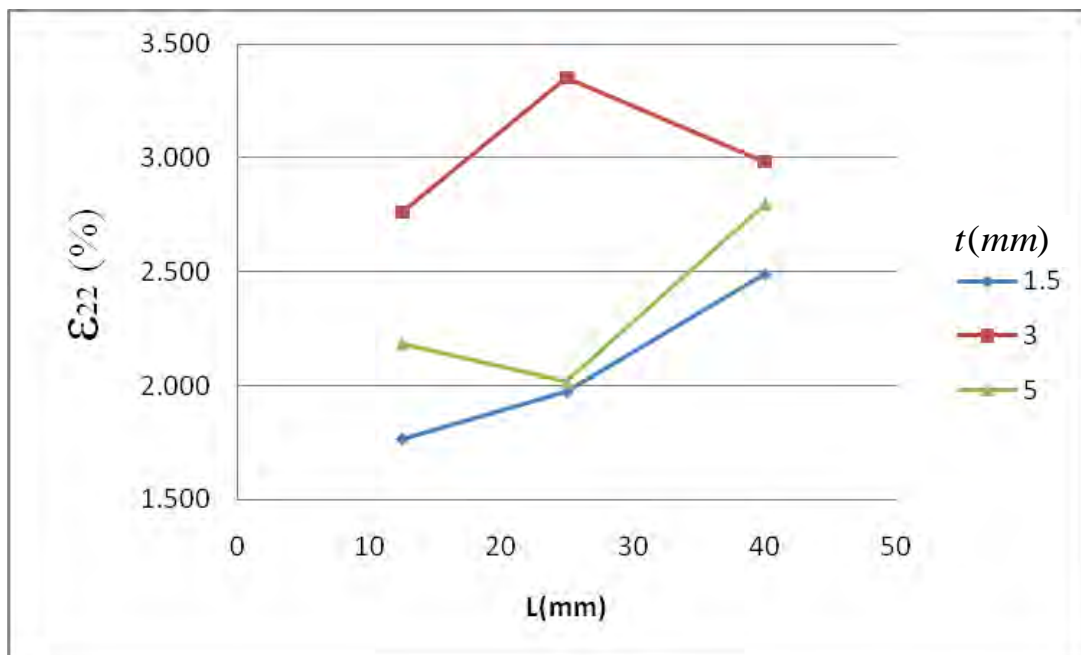


Figura 3.40. Deformações de tracção obtidas pelos modelos EF com análises elasto-plástica para as cargas de rotura médias de todas as juntas ensaiadas.

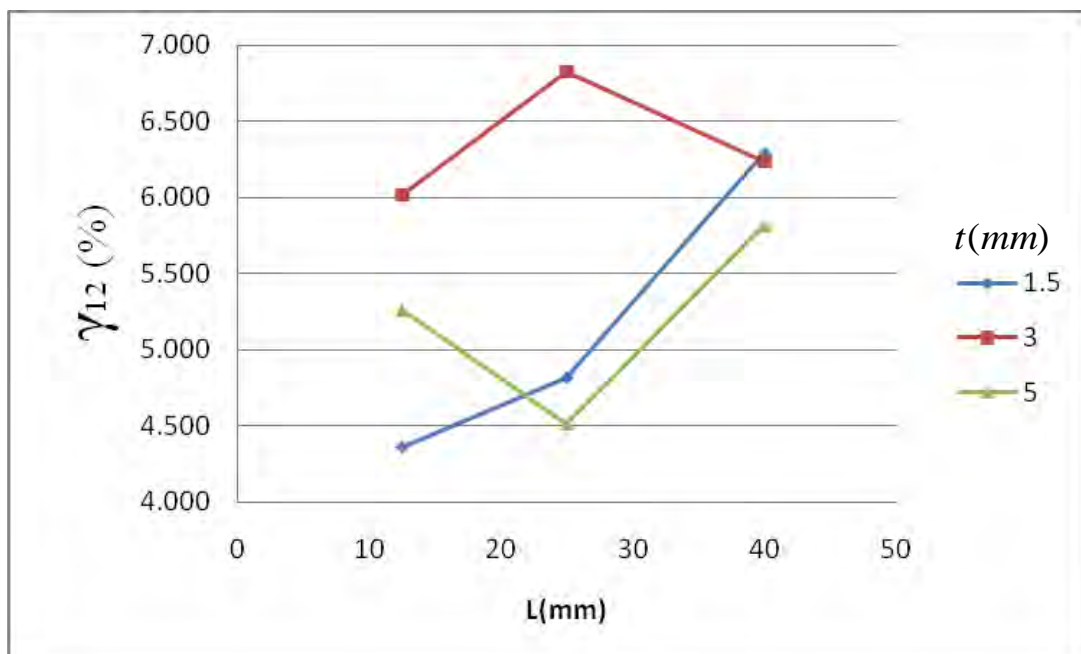


Figura 3.41. Deformações de corte obtidas pelos modelos EF com análises elasto-plástica para as cargas de rotura médias de todas as juntas ensaiadas.

## 4. Conclusões e trabalhos futuros

Neste trabalho realizou-se um estudo experimental e numérico acerca da resistência de juntas de bissobreposição simples, em que chapas de aço inox AISI 304 foram coladas com o adesivo epóxico *Araldit Standard*. Efectuaram-se ensaios de corte via tracção das chapas de juntas com diferentes geometrias: espessuras de aderente  $t = 1.5, 3$  e  $5$  mm e comprimentos de sobreposição  $L = 12.5, 25$  e  $40$  mm. Estas geometrias foram escolhidas na sequência de análises numéricas por elementos finitos, que mostraram haver uma variação apreciável das tensões nos bordos que, em princípio se relacionariam com as cargas de rotura experimentais.

Os resultados experimentais revelaram as tendências gerais esperadas, isto é, um aumento da carga de rotura das juntas com  $t$  e  $L$ , se bem que com ganhos decrescentes. De facto, a tensão de rotura média ao corte diminuiu com  $L$ , o que mostra a eficácia decrescente do aumento da área de colagem. Além disso,  $t$  não teve influência significativa acima de  $3$  mm devido ao facto dos aderentes praticamente não sofrerem flexão a partir desta espessura. De referir, todavia, que houve alguns resultados anómalos, que se julga terem estado ligados à degradação dos lotes de adesivo usados, ou à menor eficácia na remoção dos excessos de cola nos bordos. Houve também dispersões estatísticas elevadas, que se deveram provavelmente à rotura adesiva observada e ao facto de cada provete envolver duas juntas de sobreposição simples. De salientar que este modo de rotura já tinha ocorrido em trabalhos anteriores com juntas de sobreposição simples.

Finalmente, compararam-se os resultados experimentais com novas simulações numéricas por elementos finitos, que desta vez tiveram em conta o comportamento elasto-plástico dos aderentes e do adesivo. No caso deste último, porém, só foi possível considerar uma aproximação elasto-perfeitamente plástica obtida de ensaios de provetes

maciços. Infelizmente, a curva tensão-deformação ao corte não foi disponibilizada a tempo de poder ser usada neste trabalho. A referida aproximação esteve provavelmente na base de algumas discrepâncias entre as curvas carga-deslocamento numéricas e experimentais. Apesar disto, combinaram-se as simulações com os resultados experimentais no sentido de relacionar a rotura das juntas com o atingir de deformações limite de tracção ou de corte no adesivo. Naturalmente, face às limitações da análise e às anomalias nos resultados, não foi possível validar nenhuma das referidas hipóteses. Não obstante, verificou-se que a imposição de uma deformação normal limite ou de uma deformação de corte limite permitiria prever razoavelmente bem uma boa parte dos resultados experimentais.

Como seria de esperar, este estudo deixa muitas questões em aberto, que deverão ser esclarecidas em trabalhos futuros. Entre essas questões, salientam-se as seguintes:

- Avaliar a influência do estado da superfície dos aderentes no modo de rotura e resistência das juntas. Será interessante conseguir rotura coesiva no adesivo para tirar melhor partido da sua ductilidade e diminuir a dispersão na resistência das juntas;
- Utilizar aderentes de alta resistência de modo a eliminar das análises a cedência plástica dos aderentes, diminuindo assim as fontes de incerteza;
- Realizar análises por elementos finitos introduzindo o comportamento tensão-deformação real do adesivo, o que, por razões alheias a este trabalho, não foi possível apresentar;
- Estudar a aplicabilidade de critério de rotura baseados na mecânica da fractura.

## Referências

- [Adams e outros 1997] Adams RD, Comyn J, Wake WC. Structural adhesive joints in engineering. London: Chapman & Hall, 1997.
- [Adams e outros 2009] Adams RD, Cowap JW, Farquharson G, Margary GM, Vaughn D. The relative merits of the Boeing wedge test and the double cantilever beam test for assessing the durability of adhesively bonded joints, with particular reference to the use of fracture mechanics. *Int J Adhesion & Adhesives* 2009; 29:609-20.
- [Campilho e outros 2009] Campilho RDSG, de Moura MFSF, Pinto AMG, Morais JJJ, Domingues JJMS. Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs. *Compos Part B* 2009;40:149-57.
- [Carbas 2008] Carbas RJC. Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de taguchi. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, FEUP, 2008.
- [Castagnetti e Dragoni 2009] Castagnetti D, Dragoni E. Standard finite element techniques for efficient stress analysis of adhesive joints. *Int J Adhesion & Adhesives* 2009;29:125-35.
- [Goland e Reissner 1994] Goland M, Reissner E. The stress in cemented joints. *J Appl Mech* 1944;66:A17-27.
- [Hart-Smith 1987] Hart-Smith LJ. In: Engineered materials handbook, vol. 3. ASM Int., 1987, p. 471.
- [ITW 2009] Plexus structural adhesives - guide to bonding. ITW performance polymers, 2009.
- [Kafkalidis e Thouless 2002] Kafkalidis MS, Thouless MD. The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. *Int J Solids Struct* 2002;39:4367-83.



- [Morais 2005] Morais AB. Juntas coladas. Textos de apoio às aulas de Órgãos de Máquinas II. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2005.
- [Morais e outros 2007] Morais AB, Pereira AB, Teixeira JP, Cavaleiro NC. Strength of epoxy adhesive bonded stainless steel joints. *Int J Adhesion & Adhesives* 2007;679-86.
- [Rasmussen 2001] Rasmussen KJR. Full-range stress–strain curves for stainless steel alloys. Research report No R811. University of Sydney, 2001.
- [Shahin e Taheri 2007] Shahin K, Taheri F. Analysis of deformations and stresses in balanced and unbalanced adhesively bonded single-strap joints. *Compos Struct* 2007;81:511-24.
- [Silva e Adams 2005] Silva LFM, Adams RD. Measurement of the mechanical properties of structural adhesives in tension and shear over a wide range of temperatures. *J Adhesion Sci Technol* 2005;19:109–41.
- [Silva e outros 2009a] Silva LFM, Neves PJC, Adams RD, Spelt JK. Analytical models of adhesively bonded joints - Part I: Literature survey. *Int J Adhesion & Adhesives* 2009;29:319–30.
- [Silva e outros 2009b] Silva LFM, Neves PJC, Adams RD, Wang A, Spelt JK. Analytical models of adhesively bonded joints - Part II: Comparative study. *Int J Adhesion & Adhesives* 2009;29:331-41.
- [Towse e outros 1999] Towse A, Potter KD, Wisnom MR, Adams RD. The sensitivity of a Weibull failure criterion to singularity strength and local geometry variations. *Int J Adhes Adhes* 1999;19:71-82.
- [Tvergaard e Hutchinson 1996] Tvergaard V, Hutchinson JW. On the toughness of ductile adhesive joints. *J Mech Phys Solids* 1996;44:789-800.
- [Yang e Thouless 2001] Yang QD, Thouless MD. Mixed-mode fracture analysis of plastically-deforming adhesive joints. *Int J Fract* 2001;110:175-87.
- [Wang e Rose 2000] Wang CH, Rose LRF. Compact solutions for the corner singularity in bonded lap joints. *Int J Adhesion & Adhesives* 2000;20:145-54.
- [Zou e outros 2004] Zou GP, Shahin K, Taheri F. An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints. *Compos Struct* 2004;65:499–510.

[WP 2009] [http://www.engprod.ufjf.br/processos/Uniao/uniao\\_com\\_adesivos.htm](http://www.engprod.ufjf.br/processos/Uniao/uniao_com_adesivos.htm).

Página da disciplina Processos Produtivos em Engenharia de Produção (EPD017) do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil.